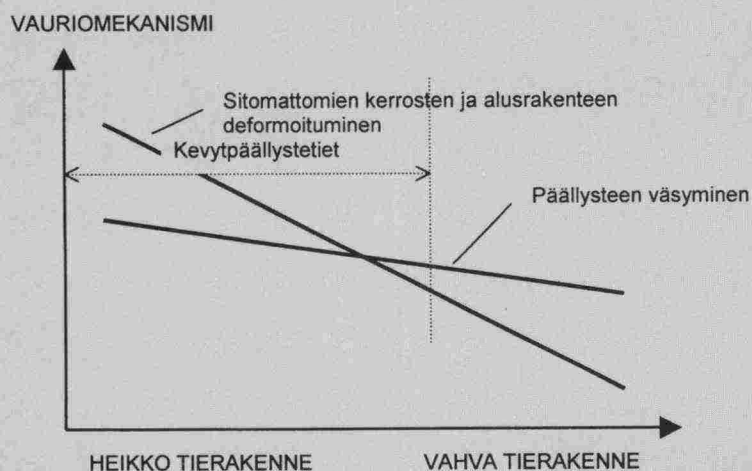


Tielaitos

Jouko Belt, Veli Pekka Lämsä, Lauri Liimatta ja Esko Ehrola

Kevytpäällysteiden vauriomallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet



Tielaitoksen
selvityksiä

18/2000

Helsinki 2000

Tuotanto
Konsultointi

Tielaitoksen selvityksiä
18/2000

Jouko Belt, Veli Pekka Lämsä, Lauri Liimatta ja Esko Ehrola

Kevytpäällysteiden vauriomallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet

Tielaitos
Tuotanto, Konsultointi

Helsinki 2000

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-635-9
TIEL 3200607

Edita Oy
Helsinki 2000

Julkaisua myy:
Tielaitoksen kirjasto
Telefax 0204 44 2652



Tielaitos
TUOTANTO
Opastinsilta 12 B
P.O. Box 157
00521 HELSINKI
Puh. 0204 44 150

TIIVISTELMÄ

Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusten kehittämisen -projektin perusteosassa on tarkasteltu pääasiassa kevytpäällysteisen tierakenteen vaurioitumisprosessia sekä määritelty tärkeimmät rakenteellisen kunnan kehittymiseen vaikuttavat vauriomekanismit. Vaurioitumisprosessien ja -mekanismien perusteella on arvioitu rakenteen mitoitushypoteesit mitoitusten kehittämiseksi. Perusteosan tuloksia on tarkoitettu hyödyntämään laadittaessa kevytpäällysteisille teille soveltuvia mitoitusmenetelmiä sekä kestoikämalleja tienpidon ohjaus- ja ylläpitojärjestelmiin (HIPS, PMS).

Kevytpäällysteisten tierakenteiden mitoitamisen lähtökohtana on hyvin pitkälle käytetty paksuille asfalttibetoni (AB) -päällysteisille teille kehitettyjä menetelmiä, missä rakenteen kuormituskestävyys määräytyy päällysteen väsymisen tai alusrakenteen deformaation perusteella. Kevytpäällysteisillä teillä, missä päällyste on ohut ja usein joustava, sitomaton kantava kerros on kuormituskestävyyden kannalta kaikkein tärkein kerros. Kevytpäällysteisillä teillä raskas liikenne aiheuttaa sitomattomaan kantavaan kerrokseen suuria rasituksia, jotka puolestaan aiheuttavat pysyviä muodonmuutoksia. Päällysrakenteen ollessa ohut myös alusrakenne deformoituu herkästi. Teiden kapeus ja jyrkät luiskat lisäävät pysyviä muodonmuutoksia.

Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumisen kannalta kriittisimpiä ja siten mitoitusten kehittämisen lähtökohdaksi otettavia tekijöitä ovat roudan aiheuttamat halkeamat sekä tien pituus- ja poikkisuuntainen epätasaisuus.

Roudan aiheuttamat halkeamat ovat pääosin pituussuuntaisia halkeamia. Pituushalkeamat johtuvat epätasaisista routanousuista tien poikkisuunnassa, jolloin päällysrakenteen yläosaan syntyy vetorasituksia. Pituushalkeamien mitoitamisessa tarkastellaan laskennallisten routanousujen ja tien leveyden mukaista pituushalkeamariskiä. Mitoittamisen lähtötietoina parantamishankkeilla tarvitaan pituushalkeamien määrä ja vaikeusaste, rakennetiedot, tien leveys, routanousuerot ja/tai routanousut sekä ilmastotiedot.

Pituussuuntainen epätasaisuus johtuu kevytpäällysteisillä teillä pääasiassa routanousujen epätasaisuudesta ja/tai alusrakenteen painumisesta. Toissijaisena syynä on liikennekuormitus. Keväällä, rakenteen sulaessa, routaepätasaisuudet aiheuttavat dynaamisia kuormituslisäyksiä, jolloin sulavaan päällysrakenteeseen syntyy helposti pysyviä muodonmuutoksia. Sulamisen edistytessä myös alusrakenteeseen alkaa muodostua pysyviä muodonmuutoksia. Routimisesta johtuvan pituussuuntaisen epätasaisuuden mitoitaminen perustuu parannettavan tien pituussuuntaiseen epätasaisuuteen ja parantamismuutoksille vauriomalleilla arvioituun pituussuuntaisen epätasaisuuden kehittymiseen. Mitoittamisessa lähtötiedoiksi tarvitaan parantamishankkeilla pituussuuntainen epätasaisuus ja sen kehittyminen ajan suhteen, rakennetiedot, routanousut ja ilmastotiedot sekä raskaan liikenteen määrä. Painumi-

sesta johtuvan pituussuuntaisen epätasaisuuden mitoittamisessa sovelletaan paksuille AB-päälysteille kehitettyjä (TPPT) menetelmiä.

Tien poikkisuuntaisen epätasaisuuden lisääntymisen perussyynä on liikennekuormitus. Toissijaisina syinä ovat routanousujen epätasaisuus (dynaaminen kuormituslisä) ja hitaasti tapahtuva pohjamaan viruminen. Poikkisuuntainen epätasaisuus ilmenee ajolinjojen kohdalle syntyvänä urautumisena ja sitä kuvaa hyvin ajourien välisen harjanteen korkeus. Poikkisuuntaisen epätasaisuuden mitoittamistapa riippuu parantamistarpeen rankkuudesta. Kevyen parantamisen mitoittaminen perustuu parannettavan tien harjanteen kehittymiseen ja vauriomalleilla arvioituun harjanteen muodostumiseen tierakenteen vasteita apuna käyttäen. Raskaassa parantamisessa mitoittaminen perustuu vauriomallien mukaiseen harjanteen muodostumiseen ja teoreettisiin laskelmiin samaan tapaan kuin uudella tiellä. Mitoittamisessa lähtötietoina tarvitaan parantamishankkeilla harjanteen korkeus ja sen kehittyminen ajan suhteen, rakennetiedot, pudotuspainolaitemittaustulosten analyysit, raskaan liikenteen määrän, routanousut sekä ilmastotiedot.

Kaikkien kolmen vauriotyyppin yhteisvaikutukset tulee otettua mitoitusmenettelyssä huomioon suorittamalla mitoittaminen tietyssä käsittelyjärjestyksessä. Ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan roudan aiheuttamia halkeamia, toiseksi pituussuuntaista epätasaisuutta ja kolmanneksi tarkastellaan poikkisuuntaista epätasaisuutta. Kussakin vaiheessa tarkistetaan, että rakenteet rajoittavat vaurioiden syntymisen sallitulle tasolle mitoitusaikana.

Uuden tien mitoittaminen poikkeaa tietyiltä osin mitoittamisesta parantamishankkeilla. Uudiskohteissa lähtötietojen hankinnassa sovelletaan samoja periaatteita kuin paksuilla AB-päälysteisillä teillä (TPPT-projekti). Pituushalkeamien mitoittamisessa tarvittavat routanousut määritetään suoraan laskennallisesti arvioidun routimiskertoimen avulla. Pituussuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen tapahtuu uusilla teillä suoraan vauriomallien avulla. Poikkisuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen puolestaan perustuu uusilla teillä (ja raskaalla parantamisella) arvioituun harjanteen muodostumiseen laskennallisia vasteita apuna käyttäen. Tällöin vasteiden määrittämisessä käytetään moduuleja, jotka on arvioitu samoja periaatteita noudattaen kuin paksuilla AB-teillä. Uuden sekä raskaasti parannettavan tien poikkisuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen suositellaan tehtäväksi myös analyytisellä menettelyllä, mikä sisältää kerroskohtaisen pysyvien muodonmuutosten laskennan, jolloin voidaan tarkastella rakenteen poikkigeometriaa.

Mitoitusmenettelyn avulla saadaan selvitettyä rakenteen kestävyys kannelta hyväksyttävät rakennevaihtoehdot. Lopullinen rakenteen valinta tulisi tehdä teknistaloudellisten vertailujen perusteella.

Keywords: thinly paved roads, road structure, damage, failure mechanism, service life

ABSTRACT

This study is the basic part of large project which deals with the improvement of thinly paved road failure models and design procedures. Basic part mainly consists of determining the failure processes of thinly paved roads and defining the primal failure mechanisms which contribute to the development of a structural condition. On the basis of failure processes a hypothesis for improving structure design procedure has been appraised. Results of the basic part will be utilised when composing design methods suitable for thinly paved roads and service life models for Highway Investment Programming Systems (HIPS) and Pavement Management Systems (PMS).

As regards thinly paved roads the bound part of the structure is thin and mostly flexible; unbound base course is the primary layer from the loading capacity point of view. With thinly paved roads heavy traffic causes extensive stresses to the unbound base course. These stresses cause additional permanent deformations. As all unbound layers are thin, permanent deformations will appear also in the subgrade. Narrowness of the road and steepness of the slopes increase permanent deformations.

The most critical factors that contribute to damage formation on the thinly paved road are cracks caused by frost together with longitudinal and transversal unevenness of the road. That is why these factors are suitable as base information for the enhancement of design procedure.

Cracks caused by frost are mainly longitudinal cracks. Longitudinal cracks are a consequence of uneven frost heave; uneven frost heave appears in the transverse direction of the road section resulting in tensile stresses in the upper part of the structure. Design for longitudinal cracks observes the risk for longitudinal cracks taking into account the calculated frost heave and road width. As source information for the design procedure in structure rehabilitation projects the following factors must be considered: amount and degree of difficulty of longitudinal cracks, road width and structure information, unevenness of the frost heave and climatic information.

Longitudinal unevenness on thinly paved roads is primarily due to the uneven frost heave and/or subgrade consolidation. The secondary reason is traffic loading. In the spring time, when the structure is thawing, uneven frost heave causes additional dynamic loading and permanent deformations arise easily in the thawing structure part. As thawing advances permanent deformations arise also in the subgrade. Design method for longitudinal unevenness caused by frost is based on longitudinal unevenness measured from the road to be rehabilitated and from the development of longitudinal unevenness for alternative new road structures estimated with damage models. As source information for the design procedure in structure rehabilitation projects longitudinal unevenness and its development during ageing of the road, structure, frost heave and climatic information and amount of heavy traffic are needed. When designing longitudinal unevenness caused by sub-

soil consolidation, design methods that are committed for road structures with thick asphalt concrete (AC) layer should be used.

Transversal unevenness of the road is primarily due to traffic loading. The secondary reasons are uneven frost heave (additional dynamic loading) and slow creeping of the subsoil. Transversal unevenness appears as rutting. It can be easily described with height of the ridge between ruts. Design method for transversal unevenness depends on how heavy rehabilitation methods are needed. Light structure rehabilitation design method is based on ridge height development from the road to be rehabilitated and future ridge height of the alternative new road structure that is estimated with the assistance of damage models and structures strain/stress behaviour. Heavy structure rehabilitation design method is based on development of ridge height estimated using damage models and theoretical calculations alike as with an entirely new road. As source information for the design procedure in structure rehabilitation projects ridge height and its development during time, structure, frost heave and climatic information, amount of heavy traffic and analyses of Falling Weight Deflectometer (FWD) -measurements are needed.

Interaction of all three failure types will be catered by carrying out the design procedure in a certain order. The first step is to consider the cracks caused by frost. In the second phase longitudinal unevenness is to be considered. The third step is to estimate the transversal unevenness of the road. In each step it must be confirmed that selected structures confine the damages under the permissible level during structure's design age.

Design procedure for new road structure differs in particular elements from structure rehabilitation projects. With new construction procurement of source information is carried out using the same principles as with thick AC layer structures (TPPT-project). In design for longitudinal cracks needed frost heave information is determined by theoretically estimated segregation potential (SP) of the subsoil. Design procedure for longitudinal unevenness with new construction is carried out directly with damage models. Transversal unevenness design procedure with new construction (and heavy structure rehabilitation) is based on estimated ridge height development together with FWD-measurement analyses. In that case strain/stress behaviour of the structure is defined using layer modules that are estimated by the same principles as with thick AC layers. With new construction and heavy structure rehabilitation design it is recommended that analytical design procedure will be implemented. Analytical design procedure contains permanent deformation calculations for each material layer and it also takes into account the transversal road geometry.

Using the described design procedure it is possible to determine the alternative road structures from the structure strength's point of view. Eventual selection of the road structure should be made on the basis of technical-economical comparisons.

ALKUSANAT

Viime aikoina on voimakkaasti panostettu paksupäällysteisten AB-teiden tutkimiseen. Sen sijaan kevytpäällysteisten teiden tutkiminen on ollut huomattavasti vähäisempää huolimatta siitä, että kevytpäällysteisten teiden osuus päällystetystä tieverkosta on hyvin suuri. Kevytpäällysteisten teiden käyttäytymistä on yleensä arvioitu samalla tapaa kuin paksuilla AB-teillä, vaikka paksujen AB-teiden ja kevytpäällysteisten teiden käyttäytyminen poikkeaa osittain toisistaan.

Tielaitoksen johtoryhmän päätöksellä on aloitettu *Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusmenetelmien kehittäminen*- projekti. Projekti toteutetaan osavaiheittain yhteistyössä Oulun yliopiston ja VTT:n kanssa Tielaitoksen valvonnassa. Tutkimuksen tässä osavaiheessa tarkastellaan kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusmenetelmien perusteita sekä luodaan hypoteettiset mitoitusmenettelyt tutkimuksen päävastuun ollessa Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratoriollla.

Tielaitoksen puolesta projektin ohjausryhmässä ovat olleet puheenjohtajana Aarno Valkeisenmäki (tuotanto/konsultointi) sekä jäsenenä Panu Tolla (tuotanto/konsultointi), Ismo Iso-Heiniemi (Hti), Pertti Virtala (Hti), Tuomo Kallionpää (Hti), Kari Lehtonen (Hti), ja Tuomas Toivonen (Hos). VTT Yhdyskuntatekniikan puolesta ohjausryhmässä ovat olleet Laura Apilo (sihteeri, projektikoordinaattori VTT:n osalta), Jouko Törnqvist, Harri Spoof ja Sami Petäjä. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion edustajina ohjausryhmässä ovat olleet Esko Ehrola (projektikoordinaattori OY:n osalta) ja Jouko Belt (osavaiheen vastuuhenkilö).

Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratoriossa tutkimuksen tekemiseen ja raportin laatimiseen ovat osallistuneet prof. Esko Ehrola, TkL Jouko Belt, DI Veli Pekka Lämsä ja TkL Lauri Liimatta. Tutkimuksen kohdan 2.1 "Tielaitoksen rakenteellinen kunto Tielaitoksen toiminnan suunnittelussa" on laatinut Harri Spoof (VTT Yhdyskuntatekniikka), kohdan 2.2.4.1 "Tierakenteen plastinen käyttäytyminen" Leena Korkiala-Tanttu, Rainer Laaksonen ja Jouko Törnqvist (VTT Yhdyskuntatekniikka), kohdan 3.1 "Kantavan kerroksen laatututkimus" Vesa Kallio (Tielaitos/tuotanto/konsultointi) sekä kohdan 3.2 "Tielaitoksen kuntorekisteristä saatavat vaurioitumismallit" Kari Lehtonen (Tielaitos/ Hti). Lisäksi Jouko Törnqvist (VTT Yhdyskuntatekniikka) on osallistunut merkittävässä määrin kohdan 5 "Mitoitusmenetelmien kehittämisen hypoteesit" laatimiseen.

SISÄLTÖ

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	11
2	PROJEKTIN YHTEYDESSÄ TEHDYT SELVITYKSET	13
2.1	Tien rakenteellinen kunto Tielaitoksen toiminnan suunnittelussa	13
2.1.1	Suunnittelujärjestelmien tarve	13
2.1.2	Tulosohjaus	14
2.1.3	Nykyiset järjestelmät	15
2.1.4	Järjestelmien kehittämistarpeet	19
2.2	Kirjallisuusselvitykset ja laskennalliset tarkastelut	20
2.2.1	Tierakenteen toiminta	20
2.2.2	Kevytpäälysteteiden kuormituskäyttäytyminen	21
2.2.3	Mitoitusmenetelmät	23
2.2.4	Pysyvien muodonmuutosten ennustaminen	24
2.2.4.1	Tierakenteen plastinen käyttäytyminen	24
2.2.4.2	Kimmoteoreettiset laskelmat	27
2.2.4.3	FEM-laskelmat	29
2.3	Kenttämittaukset ja -tutkimukset	31
3	MUUT SELVITYKSET	36
3.1	Kantavan kerroksen laatututkimus	36
3.2	Tielaitoksen kuntorekisteristä saatavat vaurioitumismallit	38
3.2.1	Tausta ja tavoitteet	38
3.2.2	Tavoitteelliset vaurioitumisnopeusmallit (vaikuttavat tekijät)	39
3.2.3	Mallien lähtöaineistot	41
4	KEVYTPÄÄLLYSTETEIDEN VAURIOITUMINEN	43
4.1	Kuormitukset ja vauriomekanismien lähtökohdat	43
4.2	Routanousun aiheuttama halkeilu (mekanismi)	46
4.3	Pituussuuntainen epätasaisuus (mekanismi)	48
4.4	Poikkisuuntainen epätasaisuus (mekanismi)	50
5	MITOITUSMENETTELYN KEHITTÄMISEN HYPOTEESEIT	54
5.1	Mitoittavat vauriot ja mitoituksen kehittämisen osavaiheet	54
5.2	Roudan aiheuttamat pituushalkeamat	56
5.3	Pituussuuntainen epätasaisuus	61
5.4	Poikkisuuntainen epätasaisuus	67
5.5	Eri vauriotyyppien yhteisvaikutukset	72
5.6	Käytännön näkökohtia	73
6	YHTEENVETO	75
	LÄHDELUETTELO	79

1 JOHDANTO

Kevytpäällysteiset tiet ovat tyypillisesti poikkileikkaukseltaan kapeita ja usein myös tien luiskat ovat jyrkkiä, minkä vuoksi liikennekuormituksen aiheuttamat rasisitukset ovat suuria lähellä tien reunaa. Lisäksi sitomattomat päällysrakennekerrokset ovat suhteellisen ohuita, mikä myös lisää liikennekuormituksen aiheuttamia rasisituksia. Tämän projektin yhteydessä kevytpäällysteisillä teillä tarkoitetaan ohutpäällysteisiä AB-teitä (paksuus luokkaa 40...80 mm) sekä ÖS-, KAB- ja PAB-päällysteisiä teitä. Sellaiset ohutpäällysteiset tiet, joissa on kulutuskerroksen alapuolisia bitumilla tai sementillä sidottuja kerroksia jäävät tämän tarkastelun ulkopuolelle. Tutkimus ei myöskään sisällä tierakenteita, joissa jokin rakenteen osa on tehty sitoutuvasta kuonamateriaalista.

Viime aikoina on voimakkaimmin panostettu paksupäällysteisiin AB-teihin TPPT-projektin yhteydessä, jolloin kevytpäällysteiset tiet ovat jääneet vähemmälle huomiolle. Erityisesti kevytpäällysteisten teiden kuormituskäyttäytymistä ja vaurioitumista ei aikaisemmin ole juurikaan selvitetty. Kevytpäällysteisten tierakenteiden mitoittamisen lähtökohtana on hyvin pitkälle käytetty paksuille AB-päällysteisille teille kehitettyjä menetelmiä, missä rakenteen kuormituskestävyys määräytyy periaatteessa päällysteen väsymisen tai alusrakenteen deformaation aiheutuvan tien pinnan urautumisen perusteella. Kevytpäällysteisten teiden kuormituskäyttäytyminen poikkeaa kuitenkin paksupäällysteisten AB-teiden käyttäytymisestä. Kun sidottu päällystekerros on ohut ja joustava, raskas liikennekuormitus aiheuttaa sitomattomiin rakennekerrokseen suuria rasisituksia, jotka aiheuttavat merkittäviä pysyviä muodonmuutoksia alusrakenteen lisäksi päällysrakennekerrokseen. Teiden kapeus lisää myös pysyviä muodonmuutoksia.

TPPT-projektissa ohutpäällysteiset tiet on rajattu tarkastelun ulkopuolelle. Ohutpäällysteisten teiden osuus koko tieverkosta on kuitenkin hyvin huomattava, minkä vuoksi myös ohutpäällysteisten teiden tutkimukseen panostaminen on tärkeää. Ohutpäällysteisten teiden käyttäytymisen selvittämiseksi on vuoden 1999 aikana käynnistetty laaja *Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusmenetelmien kehittäminen*-projekti, jonka osapuolina ovat Tielaitos, Oulun yliopiston Tie- ja liikennetekniikan laboratorio, ja VTT Yhdyskuntatekniikka.

Tutkimuksen tavoitteina ovat kevytpäällysteisten teiden kuormituskestävyyden selvittäminen ja kestoikämallien laatiminen Tielaitoksen tienpidon ohjaus- ja ylläpitojärjestelmiin (HIPS ja PMS) sekä Tielaitoksen mitoitusmenetelmien kehittämisen tukeminen. Kehitettävät kevytpäällysteisten teiden mitoitusmenetelmät pyritään sovittamaan TPPT-suunnittelujärjestelmään. Tutkimus toteutetaan vaiheittain seuraavasti :

- I. Perusteosa
- II. Olemassa olevan havaintoaineiston kokoaminen, analysointi ja täydentäminen

- III. Lähtöaineiston täydentäminen
- IV. Kestoikämallien kehittäminen
- V. Mitoitusmenettelyn kehittäminen

Tässä raportissa käsitellään tutkimuksen perusteosaa, jonka tavoitteena on selvittää kevytpäälysteisten teiden kuormituskäyttäytymistä ja vaurioitumista kirjallisuuden, kenttätutkimusten ja laskennallisten tarkastelujen sekä muissa yhteyksissä kerättyjen aineistojen avulla. Lisäksi perusteosassa selvitetään nykyisten suunnittelujärjestelmien (HIPS, PMS) toiminnallisuutta ja puutteita kevytpäälysteisten teiden osalta sekä arvioidaan suunnittelu- ja mitoitusmenettelyn kehittämistarpeita Tielaitoksen kannalta. Osaselvitysten perusteella määritellään tärkeimmät kevytpäälysteisen tien toiminnallisen ja rakenteellisen kunnon kehittymiseen vaikuttavat tekijät tierakenteen vaurioitumisprosessissa sekä luodaan hypoteesit mitoitusmenettelyn kehittämiseksi.

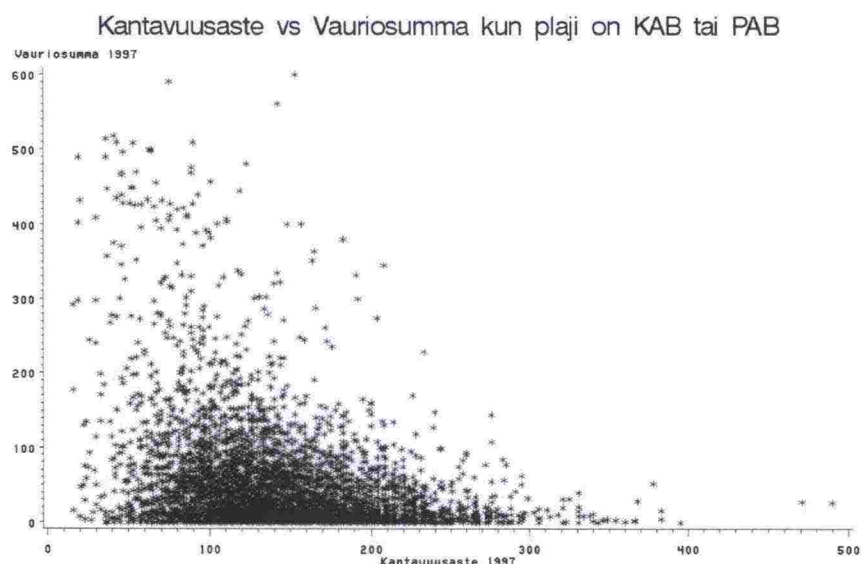
2 PROJEKTIN YHTEYDESSÄ TEHDYT SELVITYKSET

2.1 Tien rakenteellinen kunto Tielaitoksen toiminnan suunnittelussa

2.1.1 Suunnittelujärjestelmien tarve

Päällystettyjen teiden ylläpidon ja korvausinvestointien toiminnansuunnittelussa tarvitaan tietoa tien pinnan kunnosta sekä tien rakenteen kunnosta. Tien pinnan kunto on se palvelutaso, jota viime kädessä käyttäjille tarjotaan ja joka vaikuttaa tien käyttäjien kustannuksiin. Pintakunnon seuraaminen ei kuitenkaan riitä yksin tien palvelutasosta huolehtimiseen, koska rakenteet vaikuttavat pintakunnon kehittymiseen ja sitä kautta tienpitäjälle aiheutuviin kustannuksiin. Seurattavat kuntomuuttajat ovat nykyään tasaisuus (IRI), urasyvyys, vauriosumma ja kantavuusaste.

Pintakuntomittausten yleistettyä päähuomio tiestön ylläpidossa on kohdistunut pintakuntopolitiikkaan. TPPT-projekti on tuottanut tietoa tierakenteiden käyttäytymisestä hanketasolla, mutta tieverkkotasolla käyttäytymistä ei ole yhtä paljon tutkittu. Rakenteellista kuntoa on arvioitu pääasiassa kantavuusmittausten tuottaman keskitaipuman perusteella lasketusta kantavuusasteesta. On kuitenkin todettu, että kantavuusaste ei kovin hyvin selitä tien rakenteellisen kunnan kehittymistä ja vaurioitumista (kuva 1). Tästä syystä käynnistettiin "Rakenteellisen kunnan tunnuslukujen kehittäminen" projekti vuonna 1997. Käynnissä olevan projektin tavoitteena on kehittää ylläpitojärjestelmille käyttökelpoinen rakenteellinen tunnusluku sekä kes-toikämallit kestopäällysteisille teille [Ruotoistenmäki & Spoof, 1997; Ruotoistenmäki & Spoof, 1999].



Kuva 1. Kantavuusasteen ja vauriosumman vuorosuhde kevytpäällysteisillä teillä.

Tienpidon toiminnansuunnittelussa ja jonkin verran myös ohjelmointitasolla nimenomaan tiepopulaatiotaso on taso, jolla tien kunnonhallintaa ja etenkin rakenteellisen kunnon hallintaa olisi kehitettävä. Tienpidon suunnittelussa ja ohjelmoinnissa käytettävät muuttujat rakenteellisen kunnon osalta tulisivat kuitenkin olla mahdollisimman yhteneväiset suunnitteluohjeistojen ja normien kanssa, joita käytetään yksittäisten tiehankkeiden rakenteellisessa mitoituksessa. [Spoof, 2000]

2.1.2 Tulosohejaus

Tielaitoksen toiminnansuunnittelua ohjataan liikenneministeriön asettamilla tulostavoitteilla. Tavoitteiden toteutuminen varmistetaan Tielaitoksen sisäisellä tulosohejauksella, joka on osa keskushallinnon ja tiepiirien välistä tulosopimusta. Nykyisen hallitusohjelman mukaan "Liikenneverkot pidetään koko maassa liikenteen tarvetta vastaavassa kunnossa". Liikenneverkkoja koskevat toimenpiteet kohdistetaan ensisijaisjärjestyksessä:

1. kunnossapitoon
2. korvausinvestointeihin (rakenteellisen kunnon ja pääoma-arvon säilyttämiseen)
3. laajennusinvestointeihin
4. uusinvestointeihin

Tielaitos vastaa edellä asetettuihin odotuksiin käytössä olevan rahoituksen puitteissa. Käytössä oleva rahoitus on kuitenkin voimakkaasti vähentynyt viime vuosina. 1990-luvun alussa ylläpitokustannukset olivat runsaat 1000 miljoonaa markkaa, kun ne vuonna 1998 olivat vain 600 miljoonaa markkaa.

Liikenneministeriön asettama tulostavoite, jonka mittarina on laatutavoitteiden alittavien teiden määrä, päällystetyille teille vuodelle 1999 oli seuraava [Päällystettyjen teiden ylläpidon toimintalinjat ja ohjaus, 1999]:

"Huonokuntoisten päällystettyjen teiden määrä lisääntyy enintään 200 km ja on vuoden 1999 lopussa enintään 6400 km. Päällysteiden vaurioiden määrä kasvaa korkeintaan 5 %."

Tienpidon ohjausjärjestelmillä tuotetaan tietoa päällystetyn tieverkon kunnon hallintaan sekä pitkällä että lyhyellä tähtäimellä. Järjestelmillä mitataan toteutunutta kehitystä ja tuotetaan tietoa strategisten päätösten tueksi. Tulosohejauksessa keskeisiä kysymyksiä ovat mm. [Virtala, 1996]:

- tieverkon nykykunto
- tieverkon optimikunto
- nykykunnan ero optimikunnosta
- nykykunnan ylläpidon rahoitustarve

- tavoitekunnan saavuttamiseen tarvittavat toimenpiteet, aika ja rahoitustaso
- tiestön kunnon ja liikenteen kustannusten välinen riippuvuus
- taloudellisin rahoitustaso optimikunnan saavuttamiseksi
- rahoitusbudjetin alueellinen jako
- eri budjettitasoja vastaavat kuntoennusteet
- seuraavan vuoden tulostavoitteet
- rahoituksen muutoksen vaikutus tulostavoitteisiin

2.1.3 Nykyiset järjestelmät

Tielaitoksessa käytetään PMS-järjestelmiä (Pavement Management System) päällystettyjen teiden ylläpidon hallintaan ja korvausinvestointien toiminnansuunnittelussa. HIPS-järjestelmää (Highway Investment Programming System) käytetään verkkotasoiseen ylläpitovaihtoehtojen tarkasteluun ja projektitasolla lyhyemmän aikavälin suunnittelussa käytetään PMS91-järjestelmää. PMS91-järjestelmää ollaan parhaillaan kehittämässä tavoitteena että, PMSpro-järjestelmä tulee korvaamaan sen vuoden 1999 aikana. Näitä järjestelmiä tukee päällystetyn tiestön kuntomittauksien sisältävä kuntorekisteri (KURRE) josta myös ilmestyy uusi versio vuoden 1999 aikana sekä tierekisteri.

Tierekisteristä saadaan tiedot mm. tieosoitteista, päällystetyypistä, liikennemääristä ja liikennekuormituksesta. Liikennetiedot määritetään noin 250 LAM-pisteen (liikenteen automaattinen mittausjärjestelmä) avulla ja tiedot päivitetään noin neljän vuoden kierrolla. Vuoden 1999 aikana suoritettiin Tielaitoksen toimesta mittava akselimassatutkimus liikennekuormitustietojen tarkistamiseksi.

Kuntorekisterissä talletetaan kuntomittausten tiedot 100 metrin jaksoilta seuraavien kuntomuuttujien osalta [Päällystettyjen teiden ylläpidon toimintalinjat ja ohjaus, 1999]:

- Tasaisuus (mm/m)

Tasaisuutta kuvataan kansainvälisellä tasaisuusindeksillä, IRI (International Roughness Index). IRI kuvaa 80 km/h liikkuvan matemaattisella mallilla lasketun neljännesajoneuvon korin pystysuoraa liikettä pyörän suhteen. Tasaisuus mitataan palvelutasomittausautolla (PTM) lasertekniikan avulla.

- Urasyvyys (mm)

Tien poikkiprofiili mitataan PTM-auton 15 ultraäänianturilla kahden metrin välisinä otoksina. Kullekin 10 metrin matkalle määritetään maksimiarvo, joista lasketaan urasyvyyden keskiarvo 100 metrin osuudelle.

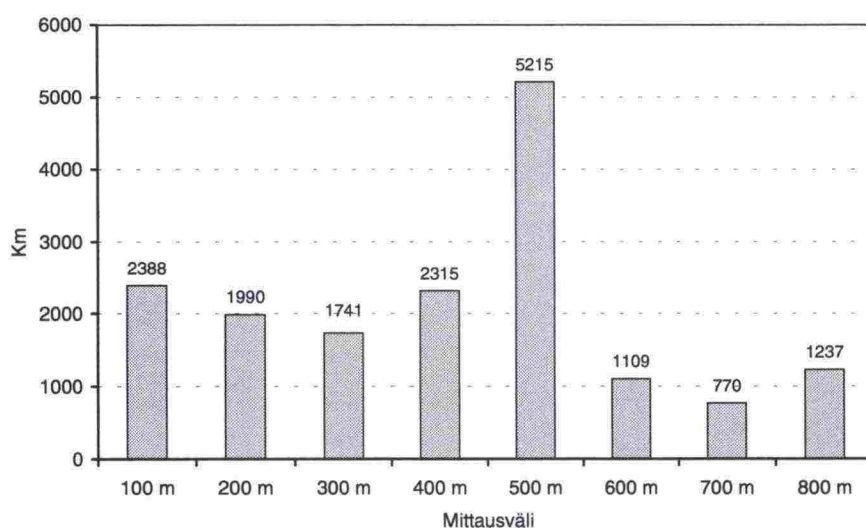
- Vauriosumma (m²)

Päällysteessä esiintyvät vauriot inventoidaan visuaalisesti päällysteen vaurioinventointilaitteella (PVI). Yksittäiset vauriot (verkko-, pituus-, poikki- ja saumahalkeamat, reiät, purkautumat, reunapainumat sekä paikat) inventoidaan erikseen metreinä, neliömetreinä tai kappaleina. Eri vauriotyypit luokitellaan vakavuusasteen perusteella yhteen tai kahteen luokkaan. Inventoinnin tuloksista lasketaan painotettu vauriosumma.

- Kantavuusaste (%)

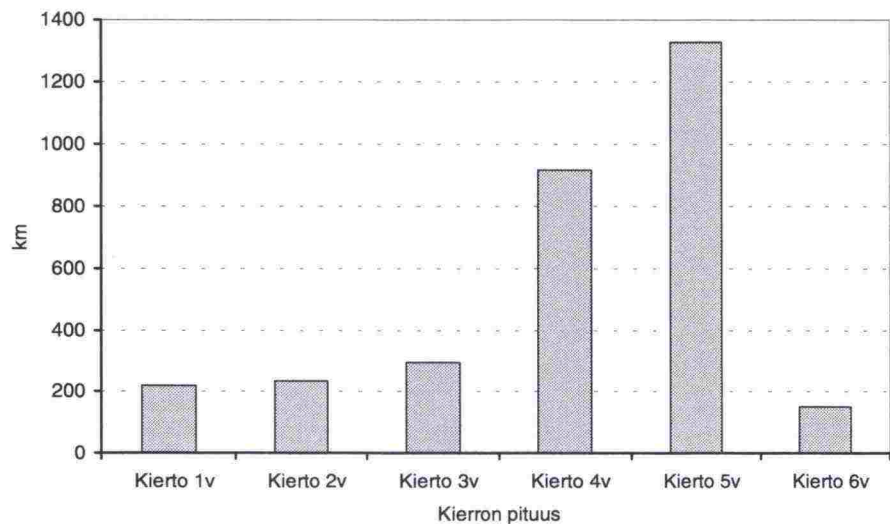
Päällystettyjen teiden kantavuudet mitataan pudotuspainolaitteella (PPL). Laite mittaa tiehen syntyvää taipumaa kuudella eri etäisyyksillä olevilla antureilla, kun tiehen kohdistetaan 50 kN kuormitus. Mitattu maksimitaipuma lämpötilakorjataan ensin 20 °C lämpötilaan, jonka jälkeen määritetään kevätkantavuuskertoimella korjattu kevätkantavuus. Saatua kevätkantavuutta verrataan kuormituskertaluvun ja suunnitteluohjeiden perusteella laskettuun tavoitekantavuuteen. Kantavuusaste on kevätkantavuuden ja tavoitekantavuuden välinen suhde.

Urasyvyys ja tasaisuus mitataan pääteiltä joka vuosi ja muilta teiltä joka toinen vuosi. Vaurioituvilta teiltä inventoidaan päällystevauriot kolmen vuoden kierrolla. Kantavuusmittaus suoritetaan keskimäärin 400-500 metrin välein (kuva 2). Kantavuusasteen laskennassa tarvittavat taipumat mitataan 4-5 vuoden välein (kuva 3). Muille 100 metrin jaksoille lasketaan kantavuusaste interpoloimalla. Mitattujen tietojen lisäksi käytetään kuntoennustemalleja, joilla ennustetaan 1-3 vuoden ikäinen tasaisuus, urasyvyys tai vauriosumma ensin nykytilaan ja siitä tarvittaessa 1-3 vuotta eteenpäin. Kuntoennustemalleja käsitellään tarkemmin projektin osavaiheessa 2.



Kuva 2. Mittaustiheyden jakauma vuosina 1991 - 1997 koko maassa kuntorekisteriin vietyjen pudotuspainomittausten perusteella [Ruotoistenmäki & Spoof, 1999].

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.



Kuva 3. Kuntorekisteriin vietyjen pudotuspainomittausten mittauskierron jakauma vuosina 1991 - 1997 koko maassa [Ruotoistenmäki & Spoof, 1999].

PMSpro-ohjelmisto on tarkoitettu käytettäväksi apuvälineenä päällystettyjen teiden ylläpidon toiminnansuunnittelussa. Sen avulla pyritään määrittämään pitkän aikavälin tienpidon tavoitteita parhaiten toteuttava toimenpide ja sen ajoitus kullekin yksittäiselle tieosuudelle. Järjestelmällä voidaan tuottaa yksi- ja useampivuotisia päällystysohjelmia sekä myös löytää tulevat rakenteenparantamiskohteet. Ohjelmistolla tehdään myös analyyskejä siitä, mitä valitulla toimenpideohjelmalla tiestön kunnolle tapahtuu. Liitesivuilla on esitetty PMSpro:n perusasetukset (liite 1), missä on esitetty:

- vaikuttavat toimenpiteet
- toimenpiteiden työmäärittelyt
- toimenpiteiden vaikutukset
- toimenpiteiden valintaehdot
- raja-arvot ja vakiot

Tieverkon kunnan ylläpitoon vaadittavia toimintastrategioita arvioidaan Tie-laitoksessa tieverkkotason PMS-järjestelmällä eli HIPS:llä (Highway Investment Programming System). Ylläpidon ohjaus perustuu neljään yllä kuvattuun kuntomuuttuun, jotka ovat olleet käytössä noin 10 vuoden ajan. Jokainen kuntomuuttu on luokiteltu kolmeen luokkaan, eli kuntoluokituksella on yhteensä 81 tilaa ($3 \times 3 \times 3 = 81$).

HIPS:ssä tieverkko on jaettu kahdeksaan osaverkkoon päällystetyypin ja liikennemäärän perusteella seuraavasti:

- kestopäällyste / kevytpäällyste
- KVL 6000 / 1500 / 800 / 350

HIPS:ssä toimenpiteet ovat jaettu seuraaviin seitsemään eri luokkaan:

- paikkaus
- remixer / pinta
- ohut uudelleenpäällystys
- paksu uudelleenpäällystys
- stabilointi
- kevyt rakenteenparannus
- raskas rakenteenparannus

Tiestön ylläpidossa on keskeistä tietää, mitä kunnon ennallaan pitäminen maksaa tienpitäjälle ja paljonko maksaa, jos kunto parannetaan tietylle tasolle. Edelleen voidaan kysyä, mikä olisi kokonaiskustannusten kannalta optimaalinen kuntotaso ja miten paljon tien käyttäjät hyötyisivät, jos kyseinen kuntotaso saavutettaisiin.

Järjestelmissä käytetään seuraavia lähtötietoja:

- tiestön nykykunto
- tiestön rappeutumismallit ja toimenpiteiden vaikutusmallit (estimoitu kuntomittauksista kerätyistä mittaustuloksista)
- ajokustannukset (ajokustannusten ja kunnon välinen riippuvuus)
- toimenpidenkustannukset ja budjettirajoitukset

Tieverkon kunnon ennallaan pitämiseen tarvittavaa toimintapolitiikkaa analysoidaan seuraavien vaiheiden kautta:

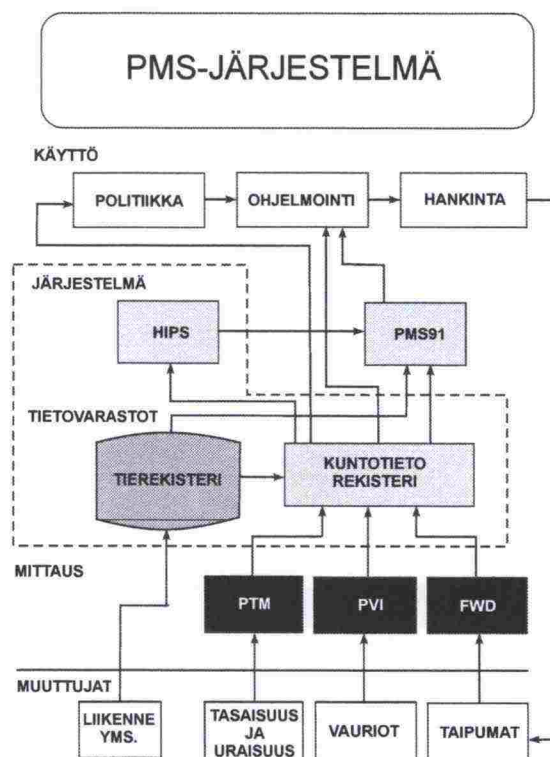
1. Otetaan lähtötilaksi nykykunto
2. Lasketaan, mikä on minimirahoitustaso ja toimenpiteet, joilla tieverkon kunto pysyy nykyisenä
3. Tulostetaan saatua budjettia vastaavat toimenpiteet
4. Tehdään herkkyystarkasteluja

Muita strategioita voidaan analysoida vastaavasti:

1. Lähtötilana nykykunto
2. Lasketaan, millä rahoitustasolla ja millä kuntotasolla tienpitäjän ja tienkäyttäjien kustannusten summa minimoituu
3. Verrataan saatua optimitilaa vallitsevaan kuntotilaan
4. Valitaan optimitila tavoitetilaksi
5. Analysoidaan paras tie (budjetti) nykytilasta tavoitteeseen ja tulostetaan valittua budjettia vastaava toimenpidetarve ja kuntoennusteet

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

Edellä kuvatut järjestelmät liittyy Tielaitoksen (ylläpidon ohjausjärjestelmät) kokonaisjärjestelmäkenttään (kuva 4). Kuvassa on esitetty päällystettyjen teiden ylläpidon järjestelmät ja miten ne liittyvät toisiinsa.



Kuva 4. PMS-järjestelmän yleiskuvaus [Päällystettyjen teiden ylläpidon toimintalinjat ja ohjaus, 1999].

2.1.4 Järjestelmien kehittämistarpeet

Tienpidon suunnittelun tasolla, HIPS-järjestelmä, ja ohjelmoinnin tasolla, PMS, tien rakenteellista kuntoa kuvataan taipumamittausten maksimitaipumaan perustuvalla kevätkantavuudella ja sen vertaamisella normien mukaiseen tavoitekantavuuteen. Nykyisin käytettävät tunnusluvut sisältävät monia puutteita, joista tärkeimmät ovat mm:

- Järjestelmissä olevista kantavuustiedoista vain pieni osa perustuu mittaukseen, valtaosa on interpoloituja
- Maksimitaipumasta laskettava kantavuus ei korreloi tien vaurioitumisen kanssa kovin hyvin (R^2 on 0.07-0.15)
- Maksimitaipuma ei kerro sitä onko suuren taipuman syy päällysrakenteessa vai alusrakenteessa
- Vuodenaikaisvaihtelu otetaan huomioon hyvin karkeasti arvioitavalla kevätkantavuuskertoimella
- Tien rakenteellisia tekijöitä (materiaaleja / paksuuksia) ei tunneta nykyisissä rekistereissä

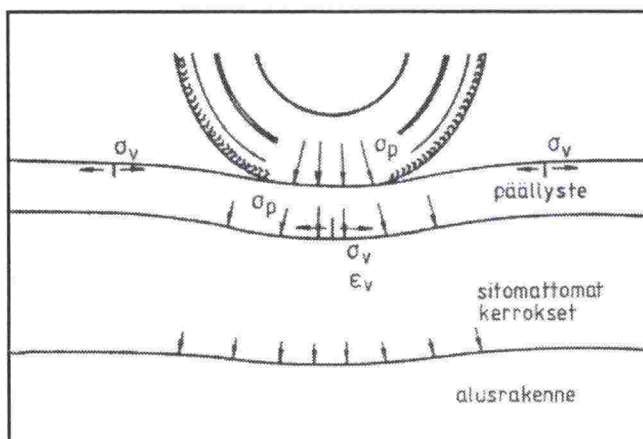
- Pohjamaata ei tunneta nykyisissä rekistereissä
- Tien kuivatusolosuhteita ei tunneta nykyisissä rekistereissä
- Vauriosumman laskennassa yhdistetään kaikki eri halkeamatyypit yhdeksi tunnusluvuksi riippumatta halkeilun syystä, joka johtaa ongelmiin vauriosumman ennustamisessa
- Reunapainumat tulisi ottaa huomioon vauriotarkasteluissa. Määrittäminen voisi tapahtua poikkiprofiilista.

“Rakenteellisen kunnan tunnuslukujen kehittäminen” projektissa kehitetään mallit vaurioitumiselle kestopäällysteisillä teillä. Nämä mallit perustuvat pudotuspainomittauksista laskettuun 300 mm:n SCI-arvoon sekä vuotui- seen kuormituskertalukuun. Kevytpäällysteisille teille ei ole vastaavia malleja. “Kevytpäällyste” projektin tavoitteena on tuottaa parametrit ja vaurioitumismallit, joita voidaan hyödyntää Tielaitoksen ylläpito- ja ohjausjärjestelmissä kevytpäällysteisillä teillä.

2.2 Kirjallisuusselvitykset ja laskennalliset tarkastelut

2.2.1 Tierakenteen toiminta

Tierakenteen toimintaa tarkasteltaessa voidaan erottaa tien toiminnallinen ja rakenteellinen kunto. Toiminnallisella kunnolla tarkoitetaan tien pintakuntoa eli palvelutasoa, jonka perusteella määräytyvät ajomukavuus, turvallisuus ja ajokustannukset. Tien rakenteellisella kunnolla ymmärretään tierakenteen kykyä kestää liikenne- ja ympäristökuormista aiheutuvat vasteet eli jännitykset ja muodonmuutokset (kuva 5).



Kuva 5. Liikennekuormituksen tierakenteeseen aiheuttamat rasitukset.

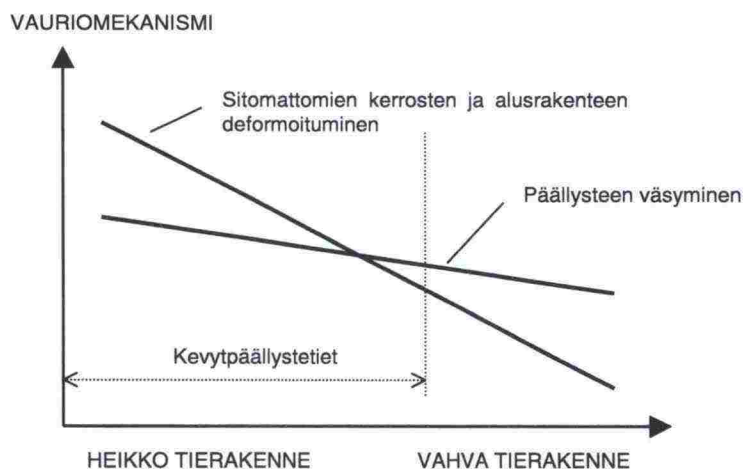
Tien rakenteellisen kunnan heikkeneminen liikenteen ja ympäristökuormitusten vaikutuksesta tulee esille erityyppisinä vaurioina. Yleisimpiä tierakenteen vaurioita ovat erilaiset halkeamat, urat, painumat ja muut muodonmuutokset. Vauriot voidaan luokitella kolmeen päätyyppiin: halkeiluvauriot,

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

deformaatiovauriot ja kulutuskerroksen hajoamisvauriot. Merkittävänä vaurioita voidaan pitää vain, jos ne heikentävät toiminnallista kuntoa tai johtavat rakenteen vaurioitumisen nopeutumiseen.

2.2.2 Kevytpäällysteteiden kuormituskäyttäytyminen

Kevytpäällysterakenteissa päällysteet ovat ohuita, minkä vuoksi yleisesti käytettyjen väsymiskestävyyttä kuvaavien mallien soveltaminen sellaisenaan on ongelmallista. Käytännössä ohutpäällysteisten teiden kuormituskestävyys riippuu sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen ominaisuuksista, tien leveydestä ja luiskankaltevuudesta, joiden vaikutusta ohutpäällysteisen tierakenteen kuormituskestävyyteen ei juuri tunneta. Ohutpäällysteisillä tierakenteilla liikennekuormitus aiheuttaa suuria rasituksia ja niiden seurauksena pysyviä muodonmuutoksia sitomattomiin päällysrakennekerrokseen ja alusrakenteeseen, minkä vuoksi ensisijainen vaurioitumisen syy on tierakenteen deformoituminen (kuva 6).

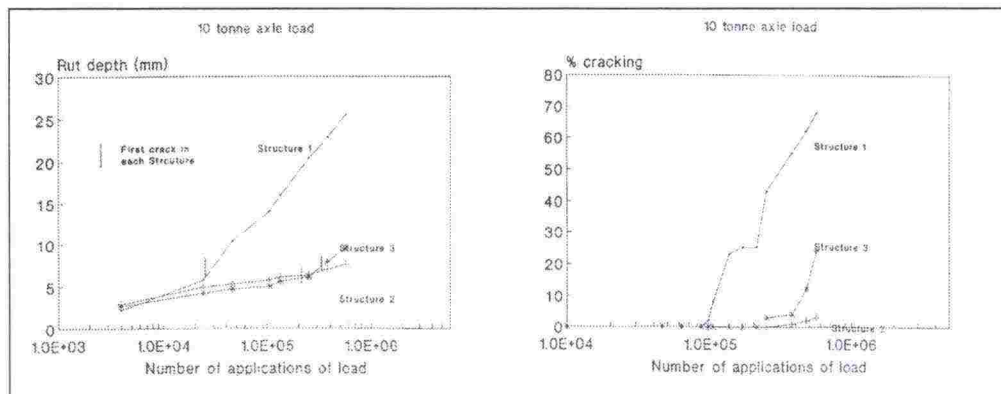


Kuva 6. Väsymis- ja deformaatiovaurioitumisen periaatteellinen riippuvuus tierakenteesta.

Kevytpäällysteisillä teillä sitomattomien päällysrakennekerrosten tiivistyminen näkyy herkästi pinnan urautumisena. Tiivistymisen jälkeen pysyvät muodonmuutokset lisääntyvät edelleen kiviainespartikkelien siirtymien seurauksena (leikkautuminen). Kiviainespartikkelien murskaantuminen ja rikkoutuminen liikennekuormituksen johdosta lisää osaltaan kantavan kerrokseen pysyviä muodonmuutoksia.

Nantesin testiradalla Ranskassa on verrattu päällysrakenteen vaikutusta tierakenteen väsymiseen ja urautumiseen [Addis, 1992]. Koetulosten perusteella kuormitus on aiheuttanut ohutpäällysteisen rakenteen (AB 60 mm) pintaan noin 15 mm syvyisen uran ennen kuin päällysteeseen on ilmennyt merkittävää halkeilua (kuva 7). Kokeen päättyessä (KKL 4.5×10^6) urasyvyys oli 25 mm ja päällysteen halkeiluaste lähes 70 %. Asfalttipäällysteen paksuuden ollessa 120 mm urasyvyys oli kehittynyt kokeen aikana suhteellisen

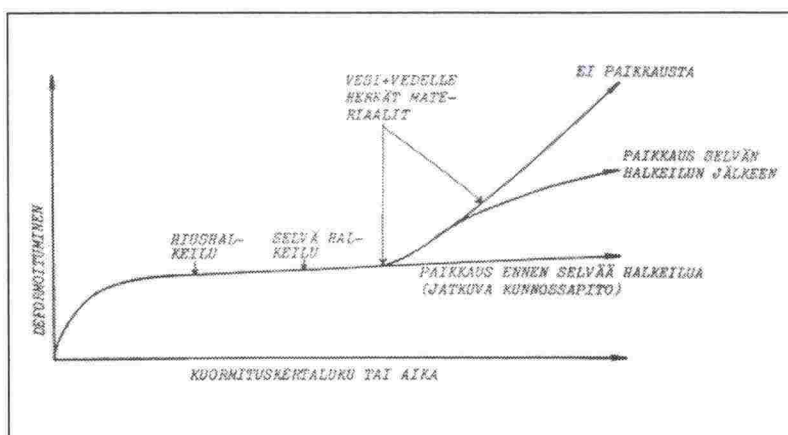
tasaisesti. Kokeen lopussa tällä rakenteella urasyvyys oli 7 mm ja halkeiluaste noin 2 %.



Rakenne 1: AB 60 mm +Ms 300 mm,
 Rakenne 2: AB 120 mm +Ms 300 mm,
 Rakenne 3: AB 60 mm +sementtistabilointi 300 mm

Kuva 7. Päällysteen urasyvyyden ja halkeilun kehittyminen erilaisilla rakenteilla Nantesin testiradalla. [Addis, 1992]

Lämpötila ja kosteus vaikuttavat tien rakennekerrosten sitomattomien materiaalien ja alusrakenteen kuormituskäyttäytymiseen. Päällysteessä ja pientareella olevat halkeamat edesauttavat sulamis- ja sadevesien pääsyä tierakenteeseen, jolloin sitomattomien kerrosten kuormituskestävyys voi alentua merkittävästi. Kevytpäällysteisillä teillä päällysteen halkeamien kautta sitomattomaan rakenteeseen pääsevä vesi lisää tierakenteen pysyviä muodonmuutoksia (kuva 8). Myös tien leveys ja luiskankaltevuus vaikuttavat kevytpäällysteisten teiden kuormituskestävyyteen.



Kuva 8. Deformoitumisen kehittyminen ohutpäällysteisessä tierakenteessa. [Craus, Yuce, Monismith, 1984]

2.2.3 Mitoitusmenetelmät

Tielaitoksessa tällä hetkellä käytettävä mitoitusmenetelmä on luonteeltaan analyttis-empiirinen, missä kuormituskestävyyttä arvioidaan tienpinnan maksimitaipumasta lasketun kantavuuden ja kokemusperäisen tavoitekantavuuden perusteella. Menetelmässä on otettu tien leveyden vaikutus kuormituskestävyyteen huomioon ns. leveyskertoimen avulla. Nykyinen menettely ei ota huomioon sitä, että liikennekuormituksen sijainti poikkileikkauksessa ei juurikaan vaihtelee kapeilla teillä (kapea ajoura).

Englantilaisessa TRRL:n (Transport and Road Research Laboratory) menetelmässä mitoitus perustuu myös tierakenteen maksimitaipumaan. Menetelmässä taipumakriteeri riippuu kantavan kerroksen tyypistä ja se on erilainen sitomattomalle, luonnollisesti sitoutuvalle sekä bitumilla tai sementillä sidotulle rakenteelle. TRRL:n menetelmässä ei oteta huomioon tien reunan ja luiskan vaikutusta tierakenteen kuormituskestävyyteen. Sidotun kerroksen paksuus on minimissään 100 mm eli selvästi suurempi Suomessa käytettävien kevytpäällysteiden paksuuksiin verrattuna. Menetelmässä tierakenteen kuntotilaa arvioidaan halkeilun ja urasyvyyden perusteella (taulukko 1).

Taulukko 1. Tierakenteen kuntotilan arviointi TRRL:n menetelmässä päällysteen vaurioiden perusteella. [Molenaar, 1995]

Kuntotila	Koodi	Näkyvät vauriot
Ehjä	1	Ei halkeilua. Urasyvyyks < 5 mm.
	2	Ei halkeilua. Urasyvyyks 5...9 mm.
Kriittinen	3	Ei halkeilua. Urasyvyyks 10...19 mm.
	4	Yksittäisiä halkeamia tai vähemmän kuin puolet pyöräuran leveydestä. Urasyvyyks ≤ 19 mm.
Vaurioitunut	5	Halkeilua yli puolet pyöräuran leveydestä. Urasyvyyks ≤ 19 mm.
	6	Ei halkeilua. Urasyvyyks > 20 mm.
	7	Yksittäisiä halkeamia tai vähemmän kuin puolet pyöräuran leveydestä. Urasyvyyks > 20 mm.
	8	Halkeilua yli puolet pyöräuran leveydestä. Urasyvyyks > 20 mm.

Tanskassa käytetyssä mekanistisessa mitoitusmenettelyssä tierakenteen kuormituskestävyyden katsotaan riippuvan myös sitomattoman kantavan kerroksen deformatumisesta, minkä suuruutta arvioidaan puristusjännitysten perusteella. Kantavan kerroksen puristusjännitykseen liittyvä mitoituskriteeri tulee erityisen merkittäväksi silloin, kun päällyste on ohut ja/tai päällysteen moduuli on alhainen. Päällystepaksuuden ollessa luokkaa 50 mm, kantavan kerroksen puristusjännityskriteerin perusteella saatava kestoikä on selvästi lyhyempi kuin päällysteen väsymiskestävyyks. Kantavan kerroksen puristusjännityksen ja sallitun kuormituskertamäärän välinen palvelutasoon (PSI=2) perustuva yhteys on mallissa seuraava [Ullidtz, 1987] :

$$N = 1000 \times \sigma_z^{-3.26} \times \left(\frac{M_r}{160} \right)^b \quad (1)$$

missä N on sallittu kuormituskertaluku
 σ_z pystysuora puristusjännitys, [MPa]
 M_r jännitystilaa vastaava materiaalin moduuli, [MPa]
 $b = 3.78$ ($M_r \leq 160$ MPa), $b = 3.26$ ($M_r > 160$ MPa)

Mallissa puristusjännitys on kantavan kerroksen moduulista riippuva, minkä vuoksi moduulin vaikutusta suhteelliseen kuormituskestävyyteen voidaan tutkia suoraan kaavan 1 moduulin potenssilausekkeen perusteella (taulukko 2). Kun kantavan kerroksen moduuli on 75 % vertailuarvosta, sallittu kuormituskertamäärä pienenee 35 %. Moduulin ollessa puolet vertailuarvosta, sallittu kuormituskertamäärä on enää 10 % vertailumoduulin mukaisesta arvosta.

Taulukko 2. *Kantavan kerroksen moduulin vaikutus puristusjännityskriteerin perusteella määritettyyn suhteelliseen kuormituskestävyyteen. Vertailumoduuli 400 MPa.*

Kantavan kerroksen moduuli M_r [Mpa]	Suhteellinen kuormituskertaluku [%]
200	10
250	22
300	39
350	65
400	100

Kirjallisuuden perusteella [Liimatta, 1999 a] voidaan todeta, että tällä hetkellä kevytpäällysteisille teille ei ole olemassa Suomen olosuhteisiin soveltuvia, valmiita mitoitusmenetelmiä, joissa otetaan huomioon paksut sitomatomat päällysrakennekerrokset, tien reunaosan kuormitus ja luiskankaltevuus. Useissa maissa tierakenteessa käytetään minimissään suhteellisen paksuja sidottuja kerroksia, jolloin mitoitus tehdään erilaisille rakenteille tyyppillisen mekanistisen menettelyn mukaan. Tällöin mitoituskriteereinä käytetään päällysteen väsymistä ja alusrakenteen deformatumista. Lisäksi mitoitusmenetelmissä tarkastellaan yleensä kuormitusten sallittua määrää. Tällöin on vaikeaa arvioida vaurioitumisnopeuksia, mitkä olisivat käytännön mitoittamisen kannalta oleellisia.

2.2.4 Pysyvien muodonmuutosten ennustaminen

2.2.4.1 Tierakenteen plastinen käyttäytyminen

Tierakenteiden mitoitusmenetelmät perustuvat yleisesti kantavuus-, routasekä pohjamaan painumamitoitukseen. Näissä menetelmissä ei arvioida rakenteen pysyvien muodonmuutoksien suuruutta. Käytännössä erityisesti kevytpäällysteisten teiden ulkouran syntyminen käynnistyy sitomattomien kerrosten pysyvistä muodonmuutoksista.

Tierakenteen pysyvien muodonmuutosten määrittämiseen sopivaa yleistä mallia ei ole olemassa [Korkiala-Tanttu et al, 1999]. Sen vuoksi yksi Kevyt-

päällyste- projektin tavoitteista on laatia realistinen urautumismalli kevytpäällysteiselle tierakenteelle. Tästä vaurioitumismallista pyritään kehittämään suhteellisen yksinkertainen analyttinen mitoitusmenetelmä.

Pysyvien muodonmuutosten suuruuteen vaikuttavia tekijöitä on useita: tien kapeus, luiskien jyrkkyys, rakennekerrosmateriaalit (erityisesti hienoaineksen laatu ja määrä), kerrospaksuudet, kerrosten tiivistyminen, kuormituksen luonne, veden pääsy ja pysyminen rakenteissa eli kuivatus sekä routiminen (sulamispehmeneminen). Siksi muodonmuutosilmiö on hyvin monimutkainen. Muodonmuutosten suuruutta määritettäessä on tehtävä useita yksinkertaistuksia. Tämän lisäksi mitoituksessa tarvittavien muodonmuutosominaisuuksien selvittäminen eri olosuhteissa eri materiaaleille ei ole helppoa. Tarvittavat laboratorio- ja maastokokeet ovat pitkäaikaisia, kalliita eikä niitä ole tehty kattavasti edes yleensä käytetyistä rakennusmateriaaleista. Lisäksi eri koemenetelmillä pystytään kuvaamaan vain jotakin tiettyjä tekijöitä, ei kaikkien tekijöiden yhteisvaikutusta muodonmuutoksiin.

Varsinaisen mitoitusmenetelmän tulisi koostua kahdesta tarkastelusta:

- kantokyky / stabiiliteettitarkastelusta erikseen koko rakenteen osalta sekä pyöräkuorman alla
- pysyvien muodonmuutosten määrittämisestä erikseen kuivissa ja märissä olosuhteissa

Kaikkien rakenteen osien stabiiliteettien tulee olla riittäviä, jolloin paikallisia murtumia tai kokonaissortumaa ei pääse tapahtumaan. Tierakenteen kantokykymitoitus voidaan tehdä perinteisiä geoteknistä kantavuusmitoitusta muokailleen. Kantokykymitoituksessa otetaan huomioon seuraavia seikkoja:

- reuna-alueen vaikutus
- rakennekerrosten paksuus
- huokosvedenpaineen kasvu roudan sulamisvaiheessa
- huokosveden alipaineilmiön vaikutus leikkauslujuuteen osittain kyllästyneille, hienoainesta sisältäville materiaaleille

Riittävän kantokyvyn lisäksi mitoitusmenetelmässä määritetään liikennekuormien aiheuttamia tien rakennekerrosten sekä pohjamaan pysyviä muodonmuutoksia. Mallinnuksessa tulee huomioida tärkeimpien muuttujien (mm. jännitystila, tiiviys, vesipitoisuus) vaikutus muodonmuutoksiin. Tiensuunnittelussa pysyvien muodonmuutosten suuruuden määrittäminen ei ole yhtä hyvin tunnettua kuin kantavuusmitoitus. Useita tierakenteeseen liittyviä ilmiöitä on tutkittu vähän tai ei ollenkaan. Tällaisia huonosti tunnettuja, osittain avoimia ilmiöitä ovat kirjallisuuden perusteella esimerkiksi:

- liikennekuorman luonne (pääjännitysten kiertyminen)
- pysyvän ja kokonaismuodonmuutoksien suhteet

- jännityshistoria ja jännitystilän purkautuminen esim. talven vaikutuksesta
- vesipitoisuuden muuttumisen vaikutus muodonmuutosominaisuuksiin
- materiaalien epälineaarisuus ja pysyvät muodonmuutokset pienillä muodonmuutostasoilla
- huokosveden alipaineen vaikutus muodonmuutosominaisuuksiin
- sulavan ja kuivuvan rakennekerrosten tiivistyminen, löyhtyminen ja jäykkyyden muutokset
- reuna-alueiden luonteeltaan kolmidimensionaalinen jännitystila ja siirtymä
- sivusiirtymät sulamisvaiheessa, kun rakenne on "jäälissä" tai huokosveden varassa

Merkittävä ero pehmeän/ohuen ja jäykän/paksun päällystekerroksen välillä on niiden tavassa jakaa liikennekuormitusta. Ohut päällystekerros ei jaa liikennekuormaa rakennekerrokseen laattarakenteena yhtä merkittävästi kuin paksumpien päällysteiden oletetaan jakavan. Lisäksi ohutpäällysteinen rakenne käyttäytyy jo suhteellisen pienillä kuormituksilla epälineaarisesti eli lineaariseen otaksumaan perustuvat muodonmuutoslaskelmat yleisesti ottaen aliarvioivat tapahtuvia palautuvia muodonmuutoksia.

Lekarp [1997] on kerännyt kirjallisuudesta useita, erilaisia pysyvää muodonmuutosta arvioivia yhtälöitä. Useimmat perustuvat kolmiakselikoetuloksiin ja muutamat koetiekoneaineistoon. Muuttujina ovat yleensä kuormituskertojen toistojen määrä sekä vaikuttavat jännitykset. Koeaineiston perusteella on havaittu kahdenlaista plastista käyttäytymistä: pienillä jännityksillä pysyvät muodonmuutokset muuttuvat olemattomiksi kuormituskertojen lisääntyessä ja suuremmilla jännityksillä pysyvät muodonmuutokset jatkuvat asteittaiseen murtoon asti. Käyttäytymisen raja-arvoa kutsutaan shakedown-rajaksi. Kirjallisuudessa on tunnustettu nämä kaksiosaiset mallit mahdollisina ratkaisuihin analogisten mallien luomista varten. Kuitenkaan yhtään todellista teorian sovellusta päällysrakenteen muodonmuutosten selittämiseksi ei ole esitetty. Sovellukset kuvaavat vain jompaa kumpaa käyttäytymistapaa. TPPT-hankkeen yhteydessä on kehitetty koetiekoneaineistoon perustuen malli ohuen tierakenteen urautumisen arvioinnista sulavan pohjamaan päällä. Mallissa muodonmuutokset jatkuvat murtoon asti. Malli perustuu melko pienen tutkimusaineistoon, lisäksi se on osin verifioimatta.

Kirjallisuudesta löytyy dynaamisia muodonmuutosominaisuuksia perusmateriaaleille sekä hienoille murskeille. Karkeampien materiaalien sekä moreenin tietoja ei ole löytynyt. Ominaisuudet on määritetty pääasiassa dynaamisilla kolmiakselikokeilla, joissa on käytetty monotonista kuormitusta. Dynaaminen kolmiakselikoe soveltuu hyvin materiaalien ns. Resilient Modulus-arvon määrittämiseen, mutta sen käyttöä materiaalien pysyvien muodonmuutosten tarkkaan määrittämiseen ei ole vielä riittävässä määrin selvitetty. Laboratoriotulosten perusteella on laadittu yksinkertaisia hyperbolisia yhtälöitä, joiden avulla voidaan arvioida liukumoduulin kehittymistä eri muodonmuutostasoilla. Useista muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavista seikoista tärkeimpiä ovat: jännitystila, huokosluku, muodonmuutostaso sekä koheesiomaalajeille

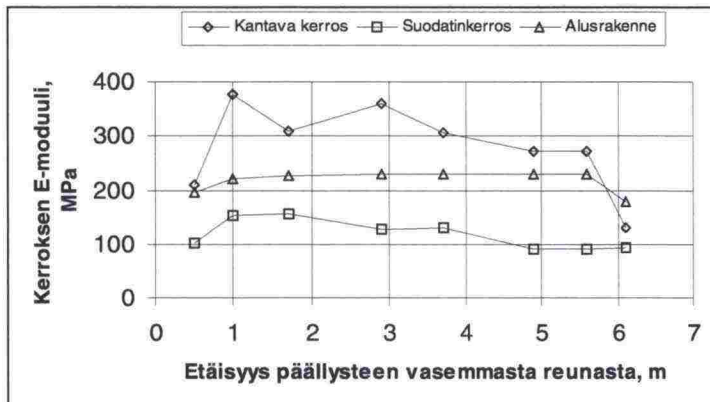
plastisuusindeksi ja ylikonsolidaatioaste. Muodonmuutosominaisuuksien määrittäminen on kehitetty yleensä koneperustusten, maanjäristyskuormien sekä off-shore-rakenteiden mitoitusarvoiksi. Niiden muokkaaminen ja soveltuvuuden selvittäminen tienrakennuskäyttöön edellyttävät koellista verifiointia.

Mitoitusmenetelmässä tulisi kantokykylaskelmin osoittaa, että rakenteen vakavuus on riittävä, jolloin pysyvät muodonmuutokset ovat hyväksyttävissä rajoissa. Lienee mahdollista lähestyä tätä ongelmaa siten, että kerroksessa vaikuttavaa maksimijännitystä - esimerkiksi leikkausjännitystä - rajoitetaan 40...60 %:iin materiaalin staattisesta murtolujuudesta, jolloin pysyvät muodonmuutokset jäävät halutun pieniksi. Pysyvän muodonmuutosten laskentatavoista mitoitusmenetelmien kannalta vaikuttavat lupaavimmilta Lekarpin ja Dawsonin sekä Sweeren esittämät yhtälöt. Mahdollisena pysyvien muodonmuutosten kuvaajana on nähtävä myös TPPT-hankkeeseen liittyvä pohjamaan urautumismalli. Vaimennuksen sekä pysyvien muodonmuutosten välillä on havaittavissa yhteys, jota mahdollisesti voidaan tarvittaessa soveltaa mitoitusmenetelmässä.

2.2.4.2 Kimmoteoreettiset laskelmat

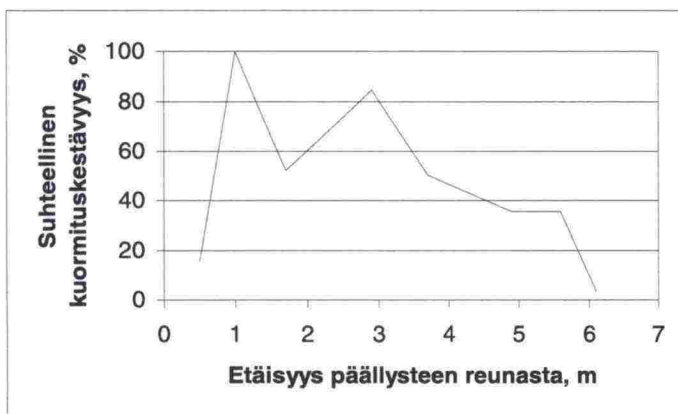
Tierakenteen pysyviä muodonmuutoksia arvioidaan kimmoteoreettisissa (resilienttimuodonmuutos-) tarkasteluissa yleensä kimmoisten muodonmuutosten perusteella. Kimmoteoreettinen rasiutilatarkastelu voidaan tehdä monikerrosohjelmilla. Esimerkiksi Kenlayer-ohjelma on tällainen kimmoteoriaan perustuva monikerrosohjelma. Ohjelman merkittävä etuna on, että siinä voidaan ottaa huomioon sitomattomien materiaalien jännitystilariippuvuus. Ohjelmassa sovitetaan iteratiivisesti liikennekuormituksesta ja kerrosten painosta aiheutuvat jännitykset sekä kerrosten moduulit. Ohjelmalla voidaan määrittää kimmoiset pysty-, vaak- ja leikkausmuodonmuutokset sekä niitä vastaavat jännitykset halutuissa pisteissä. Ohjelmaa voidaan käyttää myös hyväksi takaisinlaskettaessa tien eri kerrosten moduuleja pudotuspainolaitteella mitatusta taipumasuppilosta. Ohjelman soveltuvuus tilanteeseen, missä alusrakenne on vasta osittain sulanut, on kyseenalaista.

Syksyn 1999 pudotuspainomittauksista takaisinlaskennalla määritettyjen moduulien [Liimatta, 1999 b] perusteella mittauskohdan sijainti poikkileikkauksessa vaikuttaa merkittävästi tuloksiin (kuva 9). Monikerroskalkennan kohteena oli yksi tyypillinen kevytpäällysterakenne Lapin tiepiirissä sijaitsevista kestoikätkimien koealueista. Laskennan perusteella kantavan kerroksen moduuli on suurin pyöräuran kohdalla, missä liikennekuormitus tiivistää tien rakennetta. Ulkourasta tien reunaan päin siirryttäessä kantavan kerroksen laskennallinen moduuli pienenee merkittävästi. Suodatinkerroksen ja alusrakenteen laskennalliset moduulit ovat myös päällysteen reunan lähellä pienempiä kuin muualla poikkileikkauksessa.



Kuva 9. Kerrosten takaisinlasketut moduulit kestoikä tutkimuksen koelälyeen IX poikkileikkauksessa (7.0/6.5).

Poikkileikkaukselle laskettiin suhteellinen kuormituskestävyys sijoittamalla kantavan kerroksen moduulin arvo tanskalaisen puristusjännityskriteerin yhtälöön (vrt. kaava 1). Tarkastelun perusteella tierakenteen kuormituskestävyyttä kuvaava kuormituskertaluku vaihtelee poikkileikkauksen eri kohdissa välillä $10^4 \dots 6 \times 10^4$. Erot poikkileikkauksessa olivat huomattavan suuret, sillä suhteellinen kuormituskestävyys oli tien vasemmassa reunassa alle 20 % ja oikeassa reunassa vieläkin vähäisempi (kuva 10).



Kuva 10. Suhteellinen kuormituskestävyys poikkileikkauksessa kantavan kerroksen yläpinnan puristusjännityskriteerin perusteella (vertailukohta vasemman ulkouran sisäreuna). Kestoikä tutkimuksen koeläly IX.

Tanskalaisen puristusjännityskriteerin perusteella kantava kerros oli kriittisin rakennekerros. Suodatinkerroksen yläpinnan puristusjännitysten perusteella kuormituskestävyydeksi saatiin noin $10^5 \dots 10^6$. Alusrakenteen puristusjännitykset puolestaan antoivat sallituksi kuormituskertaluvuksi $> 10^7$.

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

Samaa puristusjännityskriteeriä soveltaen tarkasteltiin myös roudan sulamisvaiheen merkitystä tyypillisen kevytpäällysteisen tierakenteen kuormituskestävyyteen [Liimatta, 2000]. Tulosten perusteella :

- kantava kerros on kriittisempi kuin alusrakenne
- sulamisvaihe on kriittisimmillään, kun päällysrakenteen yläosa on sulanut
- tien reunalla kuormituskestävyys on selvästi pienempi kuin tien keskiosalla (alhaisemmat moduulit kuin tien keskiosalla)

Kimboteoreettisten monikerrostarkastelujen haittapuolena on se, ettei menettelyssä voida suoraan ottaa huomioon tien reunan (kuormitusetäisyyden) ja luiskan vaikutusta liikennekuormituksen aiheuttamiin tierakenteen rasituksiin. Välillisesti reunan ja luiskan kaltevuuden merkitystä voidaan karkeasti tarkastella siten, että käytetään reunassa kerrosten materiaalmoduuleille alhaisempia moduuliarvoja kuin tien keskiosassa. Tällöin on kuitenkin otettava huomioon, että laskelmien perusteissa kerrosten oletetaan olevan vaakasuunnassa äärettömiä.

2.2.4.3 FEM-laskelmat

Tien poikkileikkauksen muodon ja materiaaliominaisuuksien vaikutusta kevytpäällysteisten teiden kuormituskäyttäytymiseen arvioitiin elementtimenetelmällä (FEM). [Koskela et al, 1999] Elementtimenetelmän etuna on poikkileikkauksen geometrian vaikutusten huomioon ottaminen laskennassa, kun yleisesti käytössä olevissa monikerrosohjelmissa geometriaa ei voida periaatteessa ottaa huomioon, koska niissä rakenne oletetaan vaakasuunnassa äärettömäksi.

Elementtilaskennan pääasiallisena tavoitteena oli selvittää kuormitetun rakenteen vaurioitumisprosessia, eikä niinkään absoluuttisia rasituksien tai siirtymien arvoja. Laskentaa varten muodostettiin 23 erilaista elementtiverkkoa (rakennetta), missä muuttujina käytettiin tien leveyttä, luiskan kaltevuutta sekä erilaisia sitomattomien rakennekerrosten ja alusrakenteen ominaisuuksia.

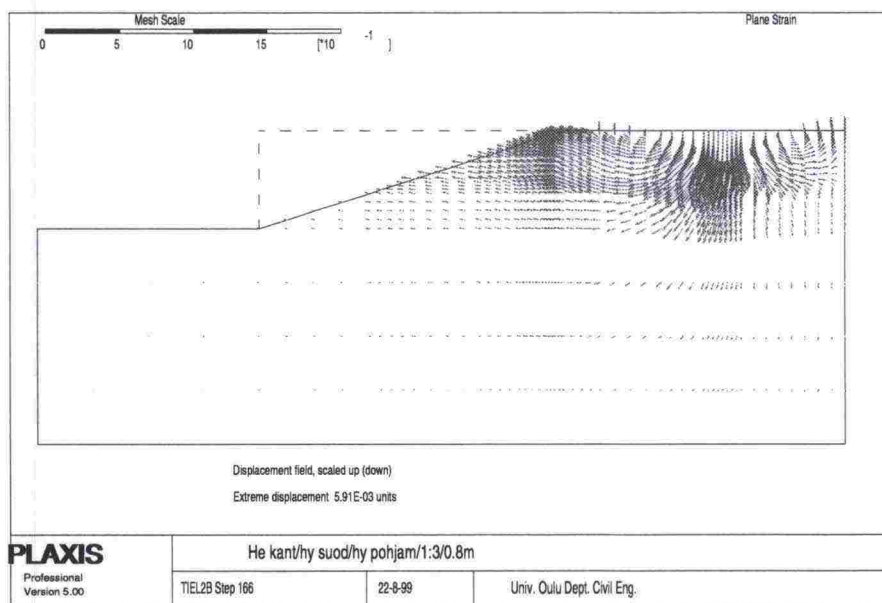
Tien leveyden vaikutus otettiin huomioon sijoittamalla liikennekuormitus kolmelle eri etäisyydelle (0.6 m, 0.85 m ja 2.4 m) päällysteen reunasta. Kuormituksen sijainti 0.6 m etäisyydellä päällysteen reunasta on tyypillinen 6.5/6.0 poikkileikkaukselle ja vastaavasti 0.85 m etäisyydellä oleva kuormitus 7.0/6.5 poikkileikkaukselle. Kuormituksen sijaitessa 2.4 m etäisyydellä päällysteen reunasta ei oleteta esiintyvän tien kapeudesta johtuvia ongelmia. Luiskan vaikutusta puolestaan arvioitiin käyttämällä kaltevuuksia 1:2 ja 1:3.

Rakennekerrosten ominaisuuksien vaikutus otettiin huomioon muodostamalla viisi erilaista rakennetta käyttäen ns. hyviä ja heikkoja materiaaleja. Hyvä rakenne sisälsi kaikissa kerroksissa ja pohjamaassa vain hyviä mate-

riaaleja ja vastaavasti heikko rakenne vain heikkoja materiaaleja. Kolmessa muussa tapauksessa yksi kerros (kantava + jakava kerros, suodatinkerros tai pohjamaa) oli heikkoa materiaalia ja muut rakenteen osat hyvää materiaalia.

Liikennekuormitusta mallinnettiin 0.26 m leveän, nauhamaisen tasokuorman avulla. Koska laskentamalliin sisällytettävien elementtien lukumäärä oli rajallinen, voitiin malliin sisällyttää vain reunimmainen pyöräkuorma. Kuormitusta lisättiin laskennan aikana asteittain, kunnes kuormitus aiheutti 3 mm siirtymän rakenteessa (muodonmuutoslujuus) ja rakenteen murtumisen (murtolujuus).

FEM- laskennan perusteella tyypillinen kevytpäällysteinen tierakenne plastisoituu merkittävästi jo nykyisin käytössä olevien suurimpien sallittujen rengaskuormien vaikutuksesta. Kuormituksen alla materiaali siirtyy alaspäin, syrjäyttäen materiaalia sivuilleen ja ylöspäin pienintä vastusta kohden (kuva 11). Luiskanpuoleinen osa materiaalista liikkuu pääasiassa vaakasuunnassa luiskaa kohden ja keskilinjän puoleinen osa materiaalista pyrkii nousemaan ylös ajourien välissä. Se, missä määrin materiaali liikkuu ylös ja sivulle päin riippuu rakennekerrosten lujuudesta.



Kuva 11. Siirtymävektorikuva kuormitetusta tierakenteesta FEM- laskennassa.

Suurin merkitys murto- ja muodonmuutoslujuuteen onkin juuri rakennekerrosten materiaaliominaisuuksilla ja niiden merkitys korostuu sitä enemmän mitä syvemmällä heikko rakenteen osa sijaitsee. Käytännössä alempien löyhien kerrosten merkitys korostuu edelleen, koska löyhien kerrosten päälle rakennettaessa uutta kerrosta ei saada tiivistettyä tai sen tiiviys ei säily optimaalisena.

FEM- laskelmissa tien leventämisellä 0.5 m oli hieman merkitystä, kun rakenne oli jyrkkäluiskainen. Selvästi suurempi vaikutus murto- ja muodonmuutoslujuuteen oli luiskan loiventamisella, varsinkin kuormituksen ollessa lähellä tien reunaa ja pohjamaan ollessa heikko. Laskennassa rakennekerroksille käytettiin samansuuruisia moduuleja koko poikkileikkauksessa. Jos laskennassa olisi otettu huomioon moduulin pieneneminen tien reunaa kohti, luiskan kaltevuuden ja tien leveyden vaikutus olisi ollut suurempi.

Rakenteita arvioitiin myös karkeasti määrittämällä niiden suhteellinen kuormituskestävyys FEM- laskennasta saatujen muodonmuutoslujuuksien avulla. Suhteellinen kuormituskestävyys määritettiin AASHO- tiekokeen yhteydessä kehitetyn ekvivalentti- eli vastaavuuskertoimen periaatetta soveltaen. Tarkastelun perusteella heikon rakenteen suhteellinen kuormituskestävyys oli luokkaa 10-15 kertaa pienempi kuin hyvällä rakenteella. Suurin vaikutus suhteelliseen kuormituskestävyyteen oli pohjamaan ominaisuuksilla. Luiskan kaltevuuden ollessa 1:2 kuormituksen etäisyydellä (tien leveydellä) oli suurempi vaikutus suhteelliseen kuormituskestävyyteen kuin luiskan kaltevuudella 1:3. Kun kuormitusetäisyys oli 2.4 m, suhteellinen kuormituskestävyys oli noin kaksinkertainen kuin arvo kuormitusetäisyydellä 0.6 m.

FEM- laskennan avulla pystyttiin varsin kohtuullisesti mallintamaan liikenteen kuormittaman rakenteen käyttäytymistä ja vaurioitumismekanismeja erilaisissa poikkileikkauksissa. Laskennasta saatujen kokemusten perusteella elementtimenetelmä soveltuukin hyvin yksittäisten tutkimusten apuvälineeksi. Varsinaisen rakenteen mitoituksen työvälineeksi elementtimenetelmä ei kuitenkaan vielä tällä hetkellä ole käyttökelpoinen. Elementtiohjelmien käyttäminen edellyttää suuren parametrijoukon määrittämistä, minkä johdosta laskennan suorittaminen on työlästä ja aikaa vievää. Käytetyssä menettelyssä tasokuormitus ei täysin vastaa todellista pyöräkuormaa. Myös maarakenteen muodonmuutoskäyttäytymisen mallintaminen sisältää tiettyjä epävarmuustekijöitä, koska materiaalimalleilla on vaikeaa simuloida lyhytaikaista impulssimaista kuormitusta. Siksi on ongelmallista päätellä, milloin menetelmän tarkkuus on riittävä absoluuttisten muodonmuutosten ja rasitusten määrittämiseksi ilman verifiointia kenttäaineistolla. Tällä hetkellä menettely ei ole kovinkaan käytännöllinen ja nykyisessä muodossaan FEM-ohjelmat onkin suunnattu lähinnä rajalliselle asiantuntijajoukolle. Tilanne on kuitenkin nopeasti muuttumassa ja onkin oletettavaa, että 3...5 vuoden kuluessa FEM- ohjelmat ovat käyttökelpoisia käytännön työvälineitä.

2.3 Kenttämittaukset ja -tutkimukset

Tierakenteen kestoikä tutkimuksen [Belt, 1999] Etelä-Lapissa sijaitsevilla koealueilla on seurattu vuosina 1985-1999 tierakenteiden toiminnallista ja rakenteellista kuntoa ja niiden kehittymistä mm. routanousu- ja kantavuusmittauksilla, vauriokartoituksilla sekä pituus- ja poikkisuuntaisilla tasaisuusmittauksilla. Seurantatutkimuksessa on mukana yhdeksän öljysora- ja kaksi asfalttipäällysteistä koealuetta. Koealueet ovat varsin kapeita päällysteen leveyden ollessa öljysorakoealueilla 6.0 tai 6.5 m ja asfalttipäällysteisillä koe-

alueilla 7.5 m. Osalla koealueita päällysrakennepaksuudet sekä alusrakenteen laatu ja olosuhteet vaihtelevat huomattavasti. Osa koealueista on parannettu ennen seurannan päättymistä.

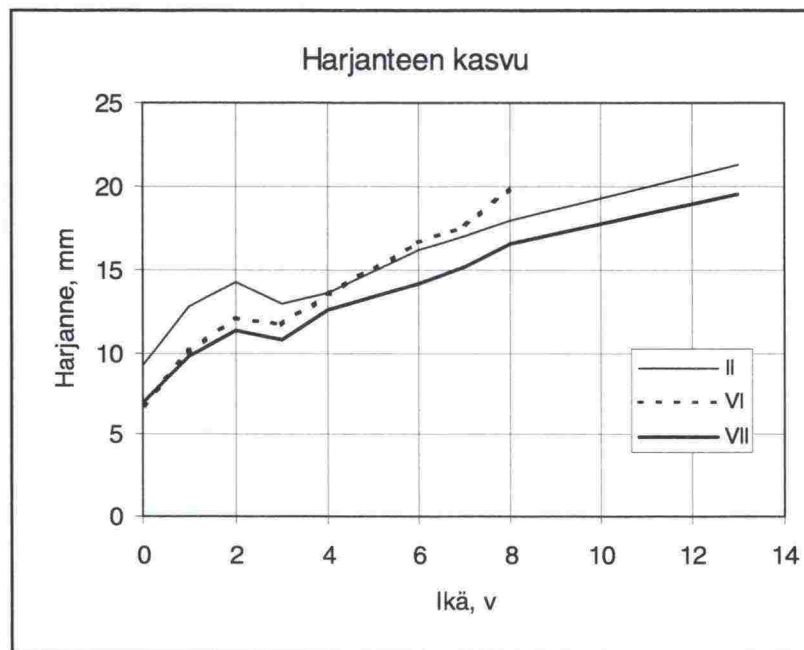
Koealueiden keskimääräiset routanousut ovat 10 ja 130 mm välillä suurimman yksittäisen routanousun ollessa 200 mm. Suurimmat routanousut ovat yleensä kohdissa, missä pohjavesi on korkealla (1.0-1.5 m tasausviivasta), routimattomien kerrosten paksuus on alle yhden metrin ja alusrakenteen materiaali on hienorakeista. Koealueilla esiintyy puolestaan painumia kohdissa, missä tierakenteessa on paksu turvekerros.

Koealueilla on jonkin verran pääasiassa kapeita poikkihalkeamia ja muutama pituushalkeama. Merkittävä osa halkeamista syntyi kahden ensimmäisen vuoden aikana parantamisen jälkeen. Osa halkeamista oli näkyvillä talvella jo rakentamisen aikana. Noin puolet poikkihalkeamista ja kaikki pituushalkeamat sijaitsevat kohdissa, missä routanousut ovat vähintään 75 tai 50 mm päällystetypistä riippuen (ÖS/AB). Poikkihalkeamia esiintyy myös alusrakenteen vaihtumiskohdissa.

Yleensä öljysorakoealueilla keväällä ja kesällä määritetyt pituussuuntaiset epätasaisuudet (IRI-arvot) ovat lähellä toisiaan. Sen sijaan asfalttipäällysteillä koealueilla keväällä määritetty IRI-arvo on selvästi suurempi kuin kesä IRI. Pituussuuntaiset epätasaisuudet ovat lisääntyneet seurannan aikana sitä enemmän mitä suuremmat routanousut ovat. Routanousujen ollessa vähäisiä (≤ 40 mm) IRI-arvot eivät ole juurikaan lisääntyneet. Ko. koealueilla alusrakenne on HkMr. Pituussuuntaista epätasaisuutta on myös alusrakenteen vaihtumiskohdissa, vaikkei esiintyisikään suuria routanousuja.

Kapeilla teillä urautuminen ei ilmene kokonaisuudessaan ulkouran syvyyksissä johtuen siitä, että reuna antaa myöten. Sen sijaan ajourien välinen harjanteen korkeus kuvastaa hyvin pysyvien muodonmuutosten syntymistä tien poikkisuunnassa. Harjanteen korkeuden määrittäminen kapeilla teillä onnistuu hyvin myös PTM-autolla päinvastoin kuin ulkouran syvyyden määrittäminen.

Harjanteen korkeus kasvaa kohtuullisen säännöllisesti vuosittain eri koealueilla ja myös pisteittäin (kuva 12). Kahtena ensimmäisenä vuotena harjanteen kasvu on hieman nopeampaa kuin myöhemmin, mikä on ilmeisesti seurausta rakenteen tiivistymisestä. Koealueet VI ja VII sijaitsevat lähellä toisiaan samalla tiellä, mistä syystä niiden liikennemäärät ovat samat. Ainoana merkittävänä erona ovat alusrakenteen olosuhteet. Koealueella VI pohjavesi on 1.0 - 1.6 m ja koealueella VII noin 2.5 m syvyydellä tien pinnasta. Koealueilla II ja VII harjanteen kasvu on puolestaan samansuuruista, vaikka koealueen II liikennemäärät ovat selvästi pienemmät kuin koealueella VII. Tämä johtuu siitä, että koealue II on 0.5 m kapeampi ja alusrakenteeltaan heikompi kuin koealue VII. Nastarengaskuluminen tai päällysteen deformaation tuminen eivät ole juurikaan vaikuttaneet tuloksiin.



Kuva 12. Harjanteen kasvu Kestoikä tutkimuksen koealueilla II, VI ja VII. Vuosi 1985 = ikä 0 vuotta.

Tulosten perusteella harjanteen kasvunopeus riippuu liikennemäärien lisäksi tien päällysrakenteesta sekä alusrakenteen laadusta ja olosuhteista. Päällysrakenteen ollessa ohut ja alusrakenteen heikko harjanne kasvaa nopeasti. Myös hyvällä alusrakenteella harjanteen korkeus lisääntyy vuosittain joskin hitaasti. Linja-autopysäkkien kohdalla harjanteen kasvu on selvästi hitaampaa kuin muualla, mikä osoittaa, että reunatuella on merkittävä vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin.

Tierakenteet levenevät vuosittain tasaisesti. Levenemisen nopeus riippuu tien kapeuden ja päällysrakenteen lisäksi voimakkaasti alusrakenteesta. Alusrakenteen ollessa heikko tierakenne levenee nopeasti. Alusrakenteen routimisella on myös ilmeisesti merkitystä levenemiseen. Osa routimisen aiheuttamasta tilavuuden lisääntymisestä tapahtuneen vaakasuuntaan. Levenemistä esiintyy myös silloin, kun alusrakenne on hyvä ts. tierakenteen leveneminen johtuu myös muista tekijöistä kuin alusrakenteesta. Mittausten perusteella ajokaistan levenemisellä ja ajourien välisellä harjanteella on selvä yhteys siten, että mitä suurempaa on leveneminen sitä nopeampaa on harjanteen kasvu. Toisin sanoen mitä enemmän rakenne leikkautuu sitä suurempi on sivusiirtymä ja harjanteen kasvu.

Koealueilla on tehty eri vuosina jonkin verran kantavuusmittauksia, mutta niiden perusteella ei pystytä arvioimaan, onko kantavuuksissa tapahtunut muutoksia, koska ei tiedetä yksittäisten mittausten tarkkaa sijaintia poikkeileikkauksessa eikä rakenteen olosuhteita. Erityisen ongelmallisia ovat keväällä tehdyt mittaukset. Kantavuusmittaukset tehdään keväällä yleensä liian aikaisin siinä vaiheessa, kun tierakenne on vasta osittain sula. Tällöin tulokset ovat vaikeasti tulkittavia, koska tierakenteen sulaminen riippuu paikalli-

sesti mm. alusrakenteen laadusta, tien sijainnista ja ympäristöstä (valoisuus/varjoisuus).

Myöskään eri vuosina mitatut (kesä) kantavuudet tai maksimi taipumat eivät korreloi erityisen hyvin keskenään. Sen sijaan eriaikaiset D5-taipumat (D1200 mm) korreloivat paikoitellen varsin hyvin. Tämä voi johtua siitä, että tien reuna vaikuttaa vähemmän D5-taipumaan kuin maksimi taipumaan tai siitä laskettuun kantavuusarvoon. Alusrakenteen olosuhde-erot näkyvät D5-arvojen tasoeroina.

Kestoikätkutkimuksen tulosten perusteella routanousujen ja tierakenteen vaurioitumisen välillä on selvä yhteys. Routanousujen lisääntyessä pituus- ja poikkisuuntaiset epätasaisuudet kasvavat sekä ajokaistan leveneminen nopeutuu. Routanousujen ja kesällä pudotuspainolaitteella mitattujen taipumien avulla määritettyjen tierakenteen vasteiden välillä on myös selvä yhteys. Erityisesti routanousut ja alusrakenteen ominaisuuksia kuvaavat D5-taipumat korreloivat keskenään, mikä johtuu siitä, että samat tekijät useimmiten vaikuttavat sekä routanousuihin että D5-taipuman arvoihin.

Myös harjanteen korkeuden ja tierakenteen vasteiden välillä on selvää riippuvuutta. Luonnollisesti tierakenteen eri vasteet (taipumat ja taipumaerot) korreloivat keskenään, koska kaikki vasteet riippuvat enemmän tai vähemmän koko tierakenteesta.

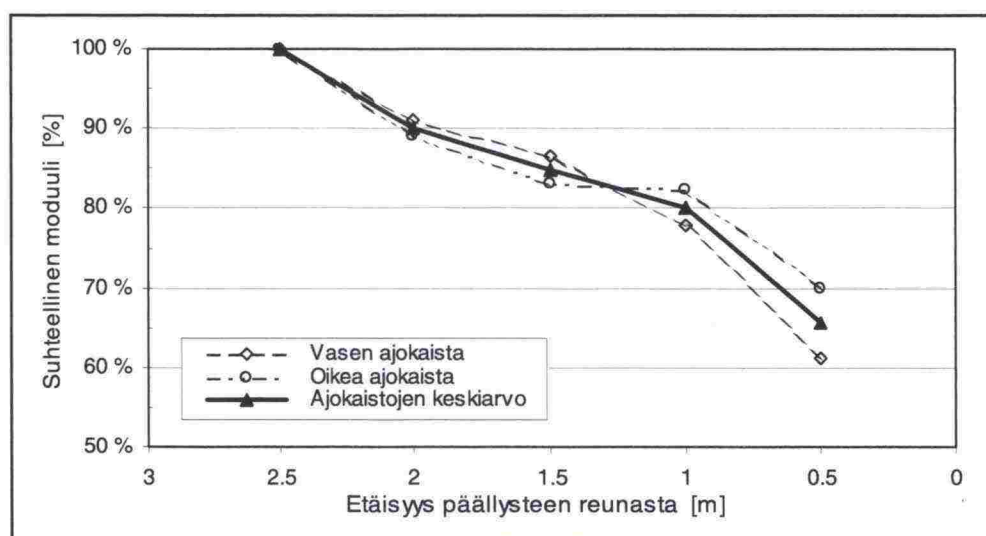
Kolme kevytpäällysteistä tietä valittiin **syksyn 1999 kenttätutkimusten** kohteeksi. [Lämsä, 1999] Kenttätutkimusten pääasiallisena tavoitteena oli selvittää poikkileikkauksen geometrian merkitystä rakenteen käyttäytymiseen ja kuormitusten aiheuttamiin rakenteen vasteisiin. Tutkimusmenetelmät sisälsivät pääasiassa ainetta rikkomattomia menetelmiä; kohteiden geometrian ja pintavaurioiden määrittämiä, profilometri- ja pudotuspainomittauksia sekä maatutkaluotauksia.

Pudotuspainomittauksien perusteella tierakenteen taipumat pääsääntöisesti suurenevät tien reunaosaa kohti mentäessä (liite 2). Voimakkainta suureneminen on rakenteen yläosaa kuvaavien D0-, D1- ja D2- taipumien (D0 mm, D300 mm ja D450 mm) osalta. Alusrakennetta kuvaavien etäistaipumien (mm. D5) suureneminen reunaa kohti on yleensä vähäistä. Taipumien avulla takaisinlaskettujen moduulien perusteella rakenteille on tyypillistä, että laskennallinen moduuli pienenee huomattavasti tien reunaosan läheisyydessä. Rakenteen ylimmälle sitomattomalle kerrokselle määritetty moduuli kenttätutkimuksissa mukana olleilla rakenteilla oli 0.5 m etäisyydellä päällysteen reunasta noin 65 % vastaavasta moduulin arvosta 2.5 m etäisyydellä päällysteen reunasta (kuva 13).

Neljässä poikkileikkauksessa tierakenne kaivettiin auki. Ajoin reunalla ylimmän sitomattoman kerroksen kuivairtitiheys (Troxler) oli hieman pienempi ja vastaavasti kosteus suurempi kuin muualla poikkileikkauksessa. Aukaisut osoittivat, että materiaaalipaksuuksien ja -laadun vaihtelu voi olla

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

hyvinkin huomattavaa, varsinkin silloin, jos kyseessä on rakentamaton, kunnossapidon yhteydessä parannettu tierakenne. Avatuille rakenteille oli tyypillistä, että ylin sitomaton kerros oheni tien reunaa kohti ja tällaisissa tapauksissa rakenteen laskennallisten moduulien pieneneminen oli huomattavaa. Pääsyinä moduulien pienenemiseen olivat kuitenkin tien kapeus, luiskien jyrkkyys ja sivuojen syvyys (sivutuen puute). Heikon alusrakenteen vaikutus heijastui koko yläpuolisen rakenteen toimintaan, mikä näkyi auki kaivetuissa tiekohdissa mm. kerrosten painumisena. Toisaalta kantava alusrakenne lievensi luiskakaltevuuden, ojan syvyyden ja päällysrakennekerrosten ominaisuuksien vaikutuksia rakenteen kuormituskestävyyteen.



Kuva 13. Ylimmän sitomattoman kerroksen suhteellinen laskennallinen moduuli poikkileikkauksessa. Vuoden 1999 kenttämittaukset teillä Pt 18717, Mt 8331 ja Mt 836.

Avattuja rakenteita verrattiin myös tien poikkisuunnassa, yhtä 500 MHz antennia käyttäen, suoritettujen maatumkaluotausten tulkintatuloksiin. Tarkastelun perusteella maatumkan avulla pystytään arvioimaan materiaalien rajapintoja kohtuullisella tarkkuudella lähinnä murskattujen kerrosten yhteispaksuuden ja pohjamaan pinnan sijainnin osalta. Kohteet, joita ei ole erityisesti rakennettu ja joilla on ajan saatossa suoritettu korjaustoimenpiteitä erilaisine materiaalien lisäyksineen, vaikeuttavat luotaustulosten tulkintaa arvaamattomuutensa vuoksi. Kuitenkin tulkinnassa tulisi käyttää ilmaisua "kerrosten sekoittuminen" harkiten, vaikka kerrosrajat eivät erottuisi selkeästi luotaustuloksissa, koska suoritettujen tierakenteen avauksien perusteella ei silmä-määräisesti arvioiden havaittu minkäänlaista kerrosten sekoittumista.

3 MUUT SELVITYKSET

3.1 Kantavan kerroksen laatututkimus

Tielaitoksen toimesta on käynnissä mm. kantavan kerroksen laatua käsittelevä projekti, jonka yhteydessä tehtiin erinäisiä kenttä- ja laboratoriotutkimuksia [Kallio, 2000]. Kenttätutkimuksia varten valittiin 25 koetietä Kaakois-Suomen, Oulun ja Vaasan tiepiirien kanta- ja paikallisteiltä. Koeteiltä valittiin edelleen 2-3 koeosuutta, joille tutkimukset kohdistettiin. Jokaiselta koeosuudelta valittiin näytteenottoa varten paikka, jossa tien päällyste poistettiin noin 1 m² alueelta reunimmaisen ajouran kohdalla. Näytteenotto-paikan ympäristössä noin 1 km:n matkalla tehtiin pudotuspainolaite- ja maatutkamittauksia paikan edustavuuden selvittämiseksi.

Koeosuuksien valintakriteerit olivat seuraavat:

- rakennettu tie, jossa yksi päällyste
- noin puolet hitaasti vaurioituneita ja puolet nopeasti vaurioituneita
- vaurioituneiden teiden ohjeellinen päällysteen ikä 3-10 vuotta ja ehji- en 7-10 vuotta
- ohjeellinen liikennemäärä 300 – 900 ajoneuvoa/vrk
- ei kohteita, joissa käytetty erikoismateriaaleja

Koeosuuksilla tehtiin seuraavat mittaukset ja määritykset:

- maatutkaus
- pudotuspainolaitemittaukset, lisäksi tihennetty mittaus näytteenotto- kohdalla
- tien rakennekerrosten paksuus, jakavan kerroksen laatu ja pohja- maan maalaji näytekairauksella
- kantavan kerroksen Troxler-mittaukset
- kantavan kerroksen Er-sondimittaukset
- näytteenotto koko kantavasta kerroksesta ja kantavan kerroksen pin- nasta
- muutamilla koeosuuksilla myös keväällä maatutkaus ja kantavuus- mittaus
- vaurioinventointi

Laboratoriossa tehtiin seuraavat määritykset:

- rakeisuus erikseen koko kantavasta kerroksesta ja kantavan kerrok- sen pintaosasta otetusta näytteestä
- IC-kokeet kolmella eri vesipitoisuudella (2%,3%,4%)
- ominaispinta-ala

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

- veden adsorptiokoe
- metyleenisinikoe
- hiekkaekvivalenttikoe
- imupainekoe
- kiviaineksen lujuuskokeiden täydennykset
- kiviaineksen geoarvio

Rakeisuuksien perusteella kantavan kerroksen pinnan hienoainespitoisuudet olivat keskiarvoltaan yhtäsuuria kuin koko kantavaa kerrosta edustavien näytteiden hienoainespitoisuudet (#0.074: 6.74 ja 6.69 %). Yksittäisissä tapauksissa kantavan kerroksen pinnassa kuitenkin esiintyi huomattavasti suurempia hienoainespitoisuuksia. Tutkituilla teillä liikennekuormitus ei ole aiheuttanut kantavan kerroksen pinnan hienonemista. Muutamilla teillä kantavan kerroksen pinnassa esiintyvät suuremmat hienoainespitoisuudet johtuvat todennäköisesti rakennusaikaisessa liikenteen hoidossa käytetystä hienoainespitoisesta murskeesta.

Kantavan kerroksen hienoainespitoisuus oli yksi parhaiten vaurioitumista selittävistä tekijöistä. Kalliomurskeilla vaurioitumisnopeus (vauriosumman kasvunopeus) kasvoi voimakkaasti hienoainespitoisuuden ylittäessä 7 % (liite 3). Tulosten perusteella tulisi harkita sallitun kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden ylärajan pienentämistä. Yläraja voisi olla esim. 5 % ja suurin yksittäinen arvo 7 %.

Troxler-mittausten perusteella tutkitut kantavat kerrokset olivat suhteellisen löyhässä tilassa. Troxlerilla määritetty kuivatilavuuspainon keskiarvo 2143 kN/m³ vastaa IC-kokeessa noin 20 työkierroksella saavutettavaa kuivatilavuuspainoa. IC-kokeessa noin 80 –100 työkierrosta vastaa kantavan kerroksen rakennusaikaista tiivistystyömäärää. Kohteilla kantava kerros on voinut löyhtyä keväällä roudan sulamisen aikaan. Toinen mahdollisuus alhaiseen mitattuun tiiviyyteen voisi olla se, että päällysteen poistamisen yhteydessä kantava kerros löyhtyy pintaosasta. Kantavan kerroksen vesipitoisuudet olivat varsin alhaisia keskiarvon ollessa 2.9 % ja hajonnan 0.6 %.

Veden adsorptiolla tai ominaispinta-alalla ei tulosten perusteella ole yhteyttä vaurioitumiseen. Myöskään imupainekokeen ja tien vaurioitumisen välille ei tässä tutkimuksessa saatu selvää yhteyttä. Muissa tutkimuksissa menetelmällä on saatu erittäin hyviä tuloksia dielektrisyyden ja murskeen olosuhdeherkkyyden välisestä yhteydestä. Lisäksi koemenetelmä on toteutukseltaan yksinkertainen kiviaineksen vedenherkkyyden testaustapa. Kuitenkin imupainekoe suositellaan otettavaksi koekäyttöön ennen lopullisten johtopäätösten tekemistä menetelmän käyttökelpoisuudesta

Tutkimuksen yhteydessä kehitettiin ns. geoarviointimenettely kiviaineksen yhdeksi laatuluokitusperusteeksi. Menettelyssä kiviaines saa pisteitä asteikolla 5-15, joista pistemäärä 5 on paras. Arvioinnin suorittaa geologi ja pisteitä annetaan seuraavien tekijöiden perusteella:

- mineraalikoko
- pehmeiden mineraalien määrä (kiille)
- sulfidimineraalien määrä
- pehmeiden mineraalien esiintymistapa

Tulosten perusteella geoarviolla on selvä yhteys vaurioitumisnopeuteen (liite 3). Geoarviomenettely kannattaisi ottaa koekäyttöön ja lisäkokemusten perusteella mahdollisesti liittää yhdeksi luokitusperusteeksi.

Kantavan kerroksen laatututkimuksessa testattiin myös Eurostandardeihin tulevia hiekkaekvivalenttikoea ja metyleenisinitestiä. Hiekkaekvivalenttikoeen koemenettely muistuttaa perinteistä lietekoea ja se korreloi hyvin maalajin hiekkapitoisuuden kanssa. Hiekkaekvivalenttikoe ei kuitenkaan tuo mitään lisäarvoa rakeisuusmäärittäykseen. Metyleenisinitesti on tarkoitettu paisuvahilaisten savien tunnistamiseen. Koemenettely on hankalahko. Tulosten perusteella metyleenisiniarvo korreloi hyvin vaurioiden kanssa, mutta koemäärä oli hyvin pieni (10 kpl), mistä syystä lopullisten johtopäätösten tekeminen ei ole mahdollista.

Tutkituilla kalliomurskekohteilla vaurioitumisnopeudet olivat keskimäärin suuremmat kuin soramurskekohteilla. Raskaan liikenteen määrällä ja päällystepaksuudella ei havaittu olevan kantavan kerroksen laatututkimuksen aiheistolla yhteyttä tien vaurioitumiseen.

3.2 Tielaitoksen kuntorekisteristä saatavat vaurioitumismallit

3.2.1 Tausta ja tavoitteet

Tielaitoksen aikaisemmissa suunnitteluohjeissa teille asetettiin päällystetyypeittäin ja liikennemääräluokittain (minimi) tavoitekantavuudet eli maksimi taipumat, joita ei saanut ylittää. Menettely sisälsi kuitenkin mm. seuraavia puutteita [Lehtonen, 2000]:

- tavallisesta poikkeavien tierakenteiden (esim. stabiloinnit) käyttäytymistä ei otettu huomioon. Mm. bitumistabiloidulle rakenteelle voidaan sallia suurempia taipumia ja sementtistabiloidulle rakenteelle pienempiä taipumia kuin perinteiselle sitomattoman kantavan kerroksen omaavalle rakenteelle, jos pyritään samaan vaurioitumisnopeuteen
- materiaalien ominaisuuksien vaikutus tierakenteen käyttäytymiseen ei perustunut laajoihin tutkimuksiin
- ohjeesta ei käynyt ilmi, kuinka paljon vaurioituminen kiihtyy, jos mitoituksista tingitään
- elinkaaritarkastelut olivat mahdottomia, koska vaurioitumiskehitystä ei voinut ennustaa
- väitetty 15 tai 20 vuoden mitoitusikä ei vastaa päällysteen tai sitomattomien kerrosten todellista kestoikää

Edellä mainitusta syistä halutaan siirtyä mitoitusmenettelyyn (laatuvaatimukset), joka perustuu erilaisten vauriotyyppien (laskennallisiin) vaurioitumisnopeuksiin. Menettelyssä suhteellinen vaurioitumisnopeus tulee voida määrittää kohdekohtaisesti taipuma-, materiaali-, olosuhde- ja liikennetietojen perusteella. Käytännön tilanteessa urakoitsija voi esim. valita, pyritäänkö hyvään kuormituskestävyyteen käyttämällä jäykkiä (pieni taipuma) vai sitkeitä materiaaleja. Tilaaja voi puolestaan arvioida esim. keveiden toimenpiteiden vaikutusta vaurioitumisnopeuksiin. Lisäksi arvioidut vaurioitumisnopeudet ovat välttämättömiä myös elinkaarilaskelmien vuoksi.

3.2.2 Tavoitteelliset vaurioitumisnopeusmallit (vaikuttavat tekijät)

Vaurioitumisnopeusmallien kehittäminen suoritetaan kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa on määritetty KURRE-aineiston perusteella vauriotyyppien (vauriosumman, verkkohalkeamien, urautumisen ja pituussuuntaisen epätasaisuuden) kehittymisnopeudet päälysteen iän suhteen. Toisessa vaiheessa on aineiston perusteella pyritty määrittämään muut vaurioiden kehittymisnopeuteen vaikuttavat tekijät.

Vaurioitumisnopeudet päälysteen iän suhteen määritetään seuraavia kaavoja käyttäen:

$$\text{Vauriosumman vaurioitumisnopeus} = \frac{\text{Havaittu vauriosumma}}{(\text{Päälysteen ikä mittaushetkellä})^2}$$

$$\text{Verkkohalkeaman vaurioitumisnopeus} = \frac{\text{Havaittu verkkohalkeamamäärä}}{(\text{päälysteen ikä mittaushetkellä} - 4 \text{ vuotta})^2}$$

$$\text{IRI:n kasvunopeus} = \frac{(\text{IRI hetkellä B} - \text{IRI hetkellä A})}{(\text{päälysteen ikä hetkellä B} - \text{päälysteen ikä hetkellä A})}$$

Teillä, missä KVL < 800 ajon/d :

$$\text{Urautumisen nopeus} = \frac{\text{Havaittu "ura"}}{\text{päälysteen ikä mittaushetkellä}}$$

Ikäeksponentit on määritetty seuraamalla kunkin tien vaurioitumisnopeuden kiihtymistä aineistossa, jossa on useita vauriohavaintoja. Valittu eksponentti on suunnilleen vauriotyyppikohtainen mediaani.

Routavaurioiden todennäköisyydelle tehdään muiden tutkimusten perusteella routanousuun perustuvat mallit.

Uusilla ja raskaasti parannettavilla teillä muut vaurioitumisnopeuteen vaikuttavat tekijät kuin ikä pyritään ottamaan huomioon mallilla, jonka yleinen muoto on seuraava :

Vaurioitumisnopeus = taipumakerroin · kantavan kerroksen laatukerroin · päällystetyyppikerroin · liikennekerroin · leveyskerroin · rakennetyyppikerroin · aluekerroin

Kaavan kertoimia ja niiden sisältämiä parametreja arvioidaan tilastollisten tarkastelujen perusteella, samoin kuin kaavan oikeellisuutta. Kaava ei ole välttämättä puhdas kertoimien tulo. Kertoimet vaihtelevat vauriotyypeittäin ja esim. vauriosummalle ne voisivat olla seuraavat:

Taipumakerroin:	(SCI300/0,3 mm) ^a
Kantavan kerroksen laatukerroin:	huono sitomaton = 1.8 hyvä sitomaton = 1.0 bit.stab.1 = 0.6 bit.stab.2 = 0.5
Päällystetyyppikerroin:	AB80 mm = 0.9 AB40 mm = 1.0 PAB-B40 mm = 1.1 PAB-V = 1.2
Liikennekerroin:	(KVL _{Raaka-ainekuljetukset} /10) ^c
Leveyskerroin:	(L/7 m) ^b
Rakennetyyppikerroin:	riippuu routimattomien kerrosten paksuudesta: yli 70 cm = 1 alle 70 cm = 1.5
Aluekerroin:	Pohjois-Suomi / Etelä-Suomi

Kevyesti parannettavilla teillä käsitetään tässä yhteydessä teitä, joissa parantamistoimenpiteenä ainoastaan lisätään vanhan päällysteen päälle si-
dottuja kerroksia. Kevyesti parannettavilla teillä muut vaurioitumisnopeuteen
vaikuttavat tekijät kuin ikä pyritään ottamaan huomioon mallilla, jonka yleinen
muoto on seuraava :

Vaurioitumisnopeus = vanhan tierakenteen vaurioitumisnopeus · taipumakerroin · päällystetyyppikerroin · kantavan kerroksen laatukerroin · rakennetyyppikerroin

Kevyesti parannettaville teillä kertoimet vaihtelevat vauriotyypeittäin ja esim. vauriosummalle ne voivat olla seuraavat:

Taipumakerroin:	(SCI300/0,3 mm) ^d
Päällystetyyppikerroin:	AB50 mm = 0.7 AB30 mm = 0.9 Karh.+PAB-V = 0.8 REMO = 1.0
Kantavan kerroksen laatukerroin:	riippuu vanhan tierakenteen kantavan kerroksen laadusta
Rakennetyyppikerroin:	ei selvitetty vielä

Kaavat ovat periaatteessa voimassa vain olosuhteissa, jotka vastaavat kaavojen määritysolosuhteita. Kevyesti parannettavan tien kaavoja ei saa käyttää tilanteissa, jossa alkuperäinen vaurioitumisnopeus on ollut poikkeuksell-

lisen pieni tai suuri tai esimerkiksi kantavassa kerroksessa on ollut erityinen vika, joka on lähes yksinään aiheuttanut vauriot. Kaavojen käytön rajaukset täsmennetään selvityksen myöhemmässä vaiheessa.

Kaavailtujen mallien haittapuolena on se, että niitä ei voida käyttää PMS-tasolla, koska mallit edellyttävät tietoa kantavan kerroksen laadusta ja raaka-ainekuljetusten määristä.

3.2.3 Mallien lähtöaineistot

Mallit pohjautuvat pääosin Inframan Ltd:ssä tehtyihin Kuntotietorekisterin (KURRE) aineiston tilastollisiin tarkasteluihin. KURRE -aineistossa monet selittävät muuttujat kuten taipuma, leveys ja liikennemäärä ovat voimakkaasti sidoksissa keskenään, mistä syystä KURRE -aineisto jaetaan periaatteessa kolmen merkittävän selittävän muuttujan suhteen homogeenisiin osa-aineistoihin, joiden sisällä tutkitaan neljännen muuttujan vaikutusta vaurioitumiseen. Tämän jälkeen verrataan kunkin osa-aineiston tuloksia keskenään ja tilanteen salliessa lasketaan osa-aineistojen havaintoparien määrän perusteella painotetut keskiarvot.

Tuloksena saadaan kullekin muuttujalle keskimääräinen vaikutus erikseen kussakin osa-aineistossa ja näistä lasketut keskiarvot. Hajonta osa-aineistojen sisällä ja osa-aineistojen välillä on suurta, mistä syystä mallit eivät anna oikeaa ennustetta yksittäiselle tielle tai tieosuudelle. Sen sijaan suurehkon homogeenisen tieryhmän vertailu toiseen suurehkoon tieryhmään on mahdollista. Tällöin eri rakennetyyppejä ja taipumaltaan erilaisia tierakenteita pystytään vertailemaan kohtuullisen oikein. Tarvittaessa KURRE -tarkastelut voidaan tehdä myöhemmin uudestaan, kun on käytettävissä pitkäaikaisempaa historiatietoa ja mahdollisesti parempaa tietoa tien poikkisuuntaisesta tasaisuudesta.

Taipumasuppilon muodon ja taipuman vaikutus vaurioitumiseen on KURRE -aineiston perusteella selkeä ja johdonmukainen. Vauriosumman ja verkko-halkeamien määrän mallintamisessa tullaan todennäköisesti käyttämään taipumien erotusta (SCI300) sekä IRI:n ja urautumisen mallintamisessa maksimi taipumaa (D0). Taipuma-arvoja sisältävissä malleissa on käytetty KURRE -aineistosta vain sellaisia 100 m osuuksia, joilta on taipumahavaintopiste.

KURRE -aineistossa taipumat on mitattu pääosin kesällä. D0 -taipuma on lämpötilakorjattu, mutta kevätkantavuuskorjausta ei ole käytetty. Muut taipuma-arvot ovat korjaamattomia. Käytännössä malleja joudutaan vielä korjaamaan, koska mitoitusajankohdaksi on kaavailtu loppukevään tilanne. Parhaillaan on käynnissä selvitys, missä verrataan RAKSU -ohjeen mukaisen moduulien avulla laskettuja loppukevään taipumia todellisista rakenteista keväällä mitattuihin ja toisaalta tierekisterissä oleviin taipumiin.

Käytännössä vaurioista suuri osa syntyy alkukevällä, kun vasta rakenteen yläosa on sulanut. Alkukevään tilanne (jyrkkä taipuma ja suuri vaurioriski) otetaan huomioon vauriomalleissa kantavan kerroksen laatua kuvaavalla kertoimella. *Kantava kerroksen laatu* -tutkimuksen perusteella PAB-teillä vaurioitumisnopeus on lähes kaksinkertainen, kun sitomaton kantava kerros on huonolaatuista, verrattuna teihin, joissa on hyvälaatuinen sitomaton kantava kerros, kun vertailupareissa on samanlainen taipuma loppukevällä.

Bitumistabilointien kuormituskestävyys -tutkimuksessa verrataan vierekkäisiä tieosuuksia, joista toiset osuudet on stabiloitu ja päällystetty ja toiset vain uudelleenpäällystetty. Lopputilanteessa kummankin tyyppisten osuuksien vaurioitumisnopeudet ovat lähes samat, vaikka stabiloidut osuudet olivat ennen parantamista vaurioituneet usein selvästi nopeammin kuin vertailuosuudet. Myös sementtistabiloitujen teiden vaurioitumista on tutkittu. Vaurioitumisen syinä ovat useimmiten päällysteen läpi päässyt suola ja pakkasrasitus.

Päällystetyypin merkitys vaurioitumiseen perustuu toistaiseksi vain KURRE -aineistoon. Uusille päällysteille tullaan muodostamaan kertoimet laboratorio-kokeiden perusteella esim. vertaamalla vanhentetun näytteen veto- ja leikkauskestävyyttä jonkun perinteisen päällysteen arvoihin.

Liikenteen merkityksestä vaurioitumiseen ei saada loogista tulosta KURRE -aineiston perusteella. Tämä johtuu joko vähäliikenteisiltä teiltä kerätyn liikennemäärätiedon epätarkkuudesta tai siitä, että vaurioituminen riippuu pääasiassa kaikkein raskaimmista raaka-ainekuljetuksista kevätolosuhteissa. Myöskään tien leveyden merkityksestä vaurioitumiseen ei saada kuin hyvin pieni ja osittain epälooginen tulos KURRE -aineiston perusteella. Liikenteen ja leveyden tarkastelu on kuitenkin vielä kesken. Parempia malleja leveyden merkityksestä odotetaan saatavan teoreettisilla laskelmilla.

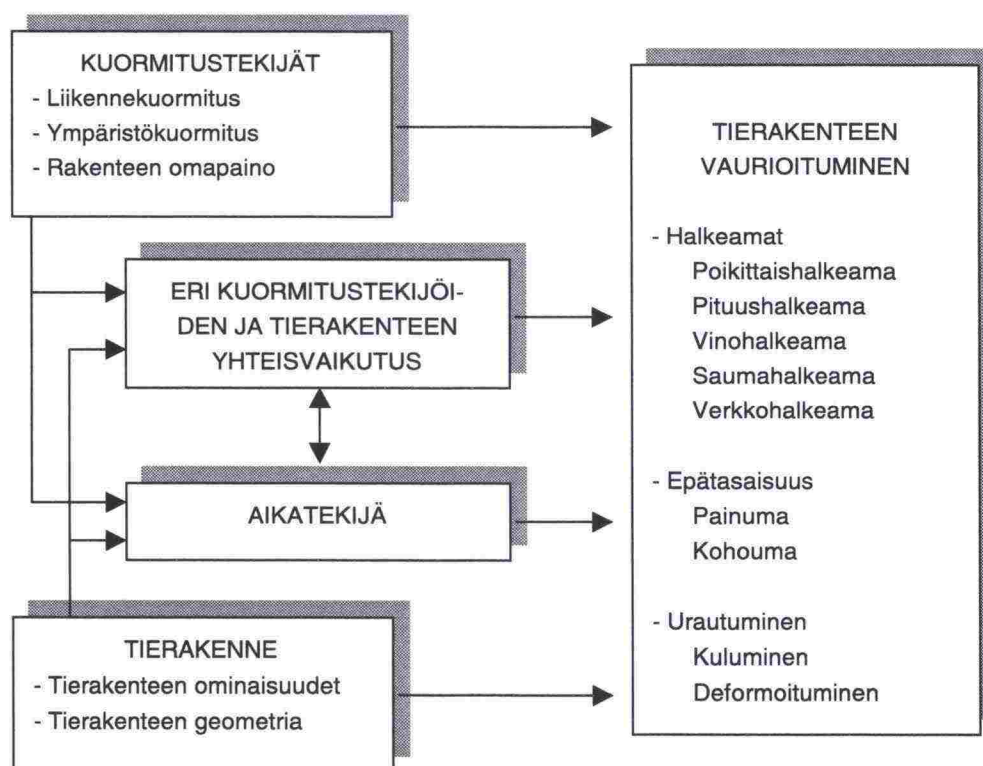
Rakennetyypin merkitys vaurioitumiseen perustuu myös KURRE -aineistoon. Rakentamattomiksi teiksi on määritelty entiset sorapintaiset yksityistiet, jotka on muutettu yleisiksi teiksi ja parannettu käyttäen korkeintaan kevyttä menetelmää päällystykseen yhteydessä. Rakennetuiksi teiksi on puolestaan määritelty tierekisterissä rakennetuiksi tai suuntaukseltaan parannetuiksi merkityt tiet sekä tiet, jotka kuuluvat luokkaan muut.

KURRE -aineiston perusteella Itä- ja Pohjois-Suomessa AB- ja KAB-päällysteiset tiet vaurioituvat hieman nopeammin kuin Etelä-Suomessa, kun taas ÖS-teillä tilanne on päinvastainen. Erot voivat johtua siitä, että Itä- ja Pohjois-Suomessa on käytäntönä soveltaa routamitoitusta myös vähäliikenteisillä teillä.

4 KEVYTPÄÄLLYSTETEIDEN VAURIOITUMINEN

4.1 Kuormitukset ja vauriomekanismien lähtökohdat

Tierakenteeseen rasituksia aiheuttavia ja sitä kautta vaurioitumista aikaansaavia kuormitustekijöitä ovat liikenne- ja ympäristökuormitus sekä rakenteen omapaino (kuva 14). Tierakenteen kuormituskestävyyden ja rakenteellisten vaurioiden kannalta merkittävin liikennekuormitus syntyy raskaan liikenteen aiheuttamana. Ympäristökuormitukset ovat pääasiallisesti ilmastosta ja sen muutoksista johtuvia. Suomen olosuhteissa ympäristökuormitusten päätekijöitä ovat vuodenaikojen kiertokulkua noudattelevat lämpötila, vesi ja routa. Rakenteen omapaino on myös kuormitusta (lähinnä painumia) aiheuttava tekijä, mutta rakenteen painoon ei juurikaan voida vaikuttaa. [COST 333, 1999]



Kuva 14. Tierakenteen vaurioitumisen osatekijät.

Liikenne- ja ympäristökuormitukset poikkeavat luonteeltaan toisistaan. Liikennekuormitus on lyhytaikaista ja usein toistuvaa kuormitusta. Ympäristökuormitus on vuodenaikojen mukaan toistuvaa ja siten vaikutusmekanismiltaan hidasta. Liikenne- ja ympäristökuormitukset vaikuttavat osittain yhtäaikaaisesti ja toisiaan kumuloiden, minkä vuoksi kuormitusten yhteisvaikutuksesta rakenteeseen syntyvä rasitus on suurempi kuin yksittäisen kuormitustyyppin aiheuttama rasitus.

Liikennekuormitus ei välttämättä aina ole suoraan vaurioitumisen syy vaan se voi ensisijaisesti aiheuttaa mm. päällysteen väsymistä ja purkautumia sekä sitomattomien materiaalien hienonemista ja siirtymistä, joiden seurauksena vaikutusten aiheuttamina varsinainen vaurioitumisprosessi etenee. Toistuvien liikennekuormitusten vaikutuksesta sidotun materiaalikerroksen alapintaan syntyy vetojännityksiä (vetomuodonmuutoksia). Tietyn kuormituskerääntymään jälkeen alkaa sidotun kerroksen alareunaan syntyä hiushalkeamia, mitä kutsutaan päällysteen väsymiseksi. Halkeamien edetessä päällysteen jäykkyys pienenee. Halkeillut päällyste ei enää pysty jakamaan kuormituksia alapuolisille sitomattomille kerroksille yhtä tasaisesti kuin toimituksessaan yhtenäisenä laattana. Sen vuoksi varsinkin ylimpään sitomattomaan kerrokseen kohdistuva rasitus suurenee ja muodonmuutokset rakenteessa kasvavat, mikä voi ilmetä mm. poikittaisena epätasaisuutena.

Tien pinnan uriin kerääntyvä vesi voi tunkeutua päällysteeseen ja myös sen alla oleviin kerroksiin, mikä vaikuttaa haitallisesti sekä päällysteen että sitomattomien materiaalien toimintakykyyn. Liiallinen kosteus pienentää varsinkin ylimmän sitomattoman kerroksen jäykkyyttä ja tällöin päällysteen halkeamariski kasvaa entisestään.

Materiaalien hienonemista tapahtuu tierakenteessa liikennekuormituksen aiheuttamana varsinkin ylimmässä sitomattomassa kerroksessa. Kun materiaalin hienoainespitoisuus hienonemisen seurauksena suurenee, myös kerroksen kyky sitoa ylimääräistä kosteutta itseensä kasvaa. Vedenimeytymiskyky riippuu luonnollisesti myös hienoaineksen laadusta (mineraloginen koostumus). Ylimääräinen kosteus jo mainitusti heikentää rakenteen kuormituskestävyyttä. Liikennekuormituksen aiheuttama materiaalin siirtyminen alas ja sivulle liikkuvan pyöräkuorman kohdalla puolestaan aikaansaa, varsinkin kevytpäällysteisille teille tyypillisesti, pysyviä muodonmuutoksia sitomattomissa kerroksissa ja alusrakenteessa. Jos tällöin tapahtuu kerrosten tiiviyden alenemista, pysyvien muodonmuutosten syntyminen nopeutuu entisestään.

Päällysteen väsymistä ja pysyviä muodonmuutoksia selitetään kuormitusten aiheuttamien vasteiden (palautuvat muodonmuutokset, jännitykset, taipumat ja niistä lasketut tunnusluvut, moduulit) avulla. Yleisesti tiedetään, että bitumisten materiaalien toiminta on voimakkaasti kuormitusajasta ja lämpötilasta riippuvaa ja että sitomattomien materiaalien kuormituskäyttäytyminen riippuu selvästi vallitsevasta jännitystilasta. Sen vuoksi materiaalien ominaisuudet (moduulit) ovat huomattavana osatekijänä tierakenteen vaurioitumisprosessissa. Päällysteen vanheneminen on myös tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttava tekijä, koska iän myötä sideaine kovenee, mikä puolestaan kasvattaa päällysteen jäykkyyttä eli päällysteen vanheneminen lisää päällysteen halkeilutaipumusta. [Ehrola, 1996]

Tierakenteen toiminnan kannalta kriittisimpinä tekijöinä pidetään sidotun kerroksen alapinnan vetomuodonmuutoksia (päällysteen väsyminen) ja alusrakenteen yläpintaan kohdistuvaa pystymuodonmuutosta, kun kyseessä on paksu AB-päällyste. Paksun bitumisen kerroksen tiivistymis-, kulumis-, de-

formoitumis- ja väsymisominaisuudet ovat tärkeitä koko tierakenteen toiminnan kannalta.

Kevytpäällysteisillä teillä, missä päällystekerros (AB, ÖS, KAB, PAB) on ohut ja varsinkin uutena joustava, sitomaton kantava kerros on kuormituskestävyyden kannalta kaikkein tärkein kerros ja sidotun päällystekerroksen merkitys on hyvin vähäinen. Liikennekuormituksen vaikutuksesta rakennekerrokseen voi syntyä pysyviä muodonmuutoksia muutenkin kuin vain alusrakenteessa tapahtuvan pystysuoran muodonmuutoksen seurauksena. Rakennekerrosten muodonmuutosten suuruus ja merkitys rakenteen toiminnan kannalta vaihtelee vuodenajoittain. Rakennekerrosten materiaaliominaisuuksilla on myös suuri merkitys muodonmuutuskäyttäytymiseen.

Vallitsevilla kosteusolosuhteilla ja tien poikkileikkauksen geometrialla on huomattava vaikutus pysyvien muodonmuutosten suuruuteen. Kosteuden vaikutukset ovat merkityksellisimmillään roudan sulamiskaudella ja sateiden jälkeen. Kevytpäällysteisen tien geometrialle on tunnusomaista, että tien poikkileikkaus on kapea ja päällysrakenne (rakennekerrokset) usein ohut. Ohuet rakennekerrokset korostavat entisestään materiaaliominaisuuksien merkitystä. Toisaalta vanhat kevytpäällysteiset tiet voivat olla myös ns. rakentamattomia, kunnossapitotoimenpiteiden yhteydessä korjattuja teitä, jolloin materiaalien laatu rakenteessa voi vaihdella huomattavasti.

Liikenteen aiheuttama kuormitus ei jakaannu tien poikkileikkauksessa tasaisesti vaan kuormitus keskittyy voimakkaasti ajolinjojen muodostamiin ajo-uriiin. Ajolinjojen sijainti puolestaan vaihtelee tien geometrian mukaan. Kapeilla teillä, missä rakenteen oma sivusuuntainen tuki on vähäistä, ajolinjat sijaitsevat tavallisimmin lähellä tien reunaa. Leveillä teillä ajolinjat vaihtelevat enemmän tien poikkileikkauksessa ja toisaalta leveän päällystetyn pientareen ansiosta liikennekuormitus ei vaikuta aivan tien reunan läheisyydessä, mistä syystä rakenne pysyy stabiilimpana kuin kapeilla teillä. Kapeat tiet ovat yleisesti myös hyvin mutkaisia, jolloin ajolinjojen vaihtelun seurauksena reunatuen puutteen merkitys painottuu entisestään. Jyrkät luiskat ja syvät sivuojat vaikuttavat myös reunatukeen.

Ympäristökuormituksista lämpötilan ja sen muutosten vaikutus kohdistuu lähinnä sidottuihin rakennekerrokseen sekä routaantumisen ja sulamisen kautta myös muihin kerrokseen. Suomen olosuhteissa lämpötilaerot eri vuodenaikojen välillä ovat huomattavia. Bitumisilla sideaineilla sidotun päällystekerroksen jäykkyys riippuu voimakkaasti lämpötilasta. Kesäaikoina päällyste pyrkii deformatumaan (urautumaan) lämpimissä olosuhteissa liikennekuormituksen vaikutuksesta. Talven kylmissä olosuhteissa ongelmana on puolestaan pakkashalkeamien muodostuminen.

Tierakenteessa oleva ylimääräinen kosteus vaikuttaa pääasiassa sitomattomien rakennekerrosten toimintaan. Osa sadevedestä imeytyy sorapientareesta, tieluiskista tai suoraan päällysteen läpi rakennekerrokseen. Sadevesi vaikuttaa myös pohjaveden pinnan korkeuteen ja sitä kautta varsinkin alus-

rakenteen vesipitoisuuteen. Liiallinen kosteus heikentää rakenteen kuormituskestävyyttä ja vaikuttaa siten tien vaurioitumiseen.

Tierakenteeseen vapautuu runsaasti ylimääräistä kosteutta myös keväällä, routivien materiaalien sulaessa. Sulamiskauden tilanteen tekee ongelmalliseksi se, että sulamisrintaman alapuolinen osa rakenteesta on vielä jäässä, minkä vuoksi ylimääräisen veden poistuminen rakenteesta vaikeutuu ja kuormituskestävyys heikkenee huomattavasti. Routivan materiaalin tiiviys on lisäksi alentunut, mikä myös heikentää kuormituskestävyyttä.

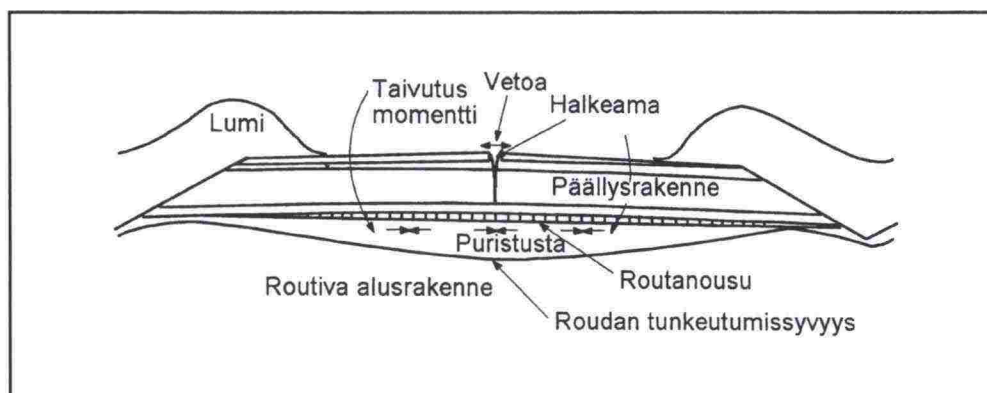
Toinen routaan liittyvä kuormitustekijä on routivan alusrakenteen jäätyminen sekä routanousut. Talven routaantumisprosessin aikaansaamana alusrakenteessa oleva ja alemmista maakerroksista imeytyvä ylimääräinen vesi jäätyy. Routivalla materiaalilla jäätyvä vesi voi aikaansaada rakenteeseen jäälinsskejä, jotka näkyvät tien pinnassa routanousuina. Routanousut ja niiden epätasaisuus heikentävät tien palvelutasoa ja lisäävät liikennekuormituksen dynaamisia vaikutuksia. Tien epätasaisuuteen vaikuttaa myös pohjamaan painuminen pehmeiköillä eli sellaisissa tien kohdissa, missä alusrakenteessa on paksusti savea tai turvetta.

Tierakenteen vaurioitumista kuvataan yleisesti erityyppisten halkeamien, epätasaisuuksien ja urautumisen avulla. Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumista ja mitoitusmenetelmiä käsittelevän projektin yhteydessä tehtyjen selvitysten perusteella kevytpäällysteisten teiden rakenteellisen ja toiminnallisen kunnon säilymisen kannalta kriittisimmiksi vauriotyypeiksi todettiin routanousujen aiheuttamat halkeamat, pituussuuntainen epätasaisuus ja poikkisuuntainen epätasaisuus (urautuminen).

Jo syntyneillä vaurioilla on myös oma merkityksensä tierakenteen käyttäytymiseen. Erilaiset tien pinnassa olevat epätasaisuudet ja vauriot lisäävät entisestään liikennekuormituksen dynaamista vaikutusta. Tierakenteen vaurioituminen on siis omalta osaltaan rakenteen vaurioitumisprosessia nopeuttava tekijä. Todellisuudessa tierakenteen kunto ja materiaalien ominaisuudet ovat liikennekuormituksen, ilmasto-olosuhteiden vaihtelun ja ikääntymisen yhteisten vaikutusten seurauksena vähitellen tapahtuvassa, mutta jatkuvassa muutostilassa koko elinkaarensa ajan.

4.2 Routanousun aiheuttama halkeilu (mekanismi)

Routanousujen aiheuttamat halkeamat voivat olla pituushalkeamia tai muita ajokaistahalkeamia, jotka esiintyvät vinosti, poikkisuuntaisesti tai muuten epämääräisesti tien pituussuuntaan nähden. Vaikka halkeamat ilmenevät päällysteen halkeiluna, käytännössä halkeamat usein ulottuvat syvälle tierakenteeseen, minkä vuoksi ne aiheuttavat myös tien rakenteellisen kunnon heikentymistä. Halkeamien perimmäisenä syynä on epätasaisten routanousujen aiheuttama vetorasitus päällysrakenteen yläosassa. Routanousun aiheuttaman vetorasituksen ylittäessä rakenteen lujuuden, tierakenteeseen muodostuu halkeamia päällysrakenteen yläosasta alkaen (kuva 15).



Kuva 15. Routanousujen aiheuttaman pituushalkeaman syntyminen tien keskialueelle. [Ehrola, 1996]

Päällystehalkeamia voi periaatteessa syntyä talven eri vaiheissa.

- routanousun kasvamisvaiheessa, kun päällyste on jäykkää ja haurasta. Vauriot syntyvät pääasiassa pakkomuodonmuutoksista johtuen eli liikenteestä riippumattomina.
- routanousun päättymisvaiheessa ja sen jälkeen, kun päällysrakenne sulaa. Vauriot syntyvät lähinnä liikenteestä johtuen päällysteen veto-, leikkaus- tai taivutusrasitusten vaikutuksesta.

Ajokaistahalkeamia esiintyy tyypillisesti tiekohdissa, missä rakenne sisältää jonkinlaisen epäjatkuvuuskohdan, jossa routivuuserot ovat paikallisesti huomattavia. Tierakenteen epäjatkuvuuskohtana voi olla jokin rakenteen osa, kuten rumpu, salaoja, putkijohto tai päällysrakennepaksuuden muutos, jotka hyvin usein sisältävät sinänsä routanousueroja tasoittavan siirtymäkii-larakenteen. Epäjatkuvuuskohdan voi aiheuttaa myös alusrakenteen materiaalin huomattava muuttuminen tai tien leventäminen. Yhteistä tällaisille tiekohdille on, että niissä esiintyy usein myös epätasaista painumista, joka korostuu liikennekuormituksen seurauksena.

Pituushalkeamia esiintyy tyypillisesti joko tien keskiosissa tai reunaosissa olevina halkeamina ja niiden sijainti riippuu tien leveydestä. Kun tie on leveydeltään luokkaa 7-9 m, pituushalkeama sijaitsee todennäköisimmin tien keskellä. Reunahalkeamat ovat tien keskiosiin muodostuvia halkeamia yleisempiä kapeilla (5-6 m) teillä. Toisaalta reunahalkeamat ovat yleisiä myös hyvin leveillä (11-12 m) teillä. [Routavaurio- ja kuivatustutkimus, Pituushalkeamat osa II, 1991]

Selvimpänä edellytyksenä pituushalkeamien muodostumiselle on riittävä routanousuero tien keski- ja reunaosien välillä. Pituushalkeamien syntymiselle kriittisenä arvona pidetään 1.5-2.0 % kulmanmuutosta routanousun korkeudessa poikkileikkauksen keski- ja reunaosien välillä. Pelkästä suuresta (maksimi)routanoususta ei siis välttämättä aiheudu pituushalkeamia,

kun routanousu tapahtuu tasaisesti koko poikkileikkauksen leveydellä. Tien reuna-alueille muodostuvien pituushalkeamien edellytykseksi katsotaan kuitenkin riittävän 50-60 mm korkuinen routanousu [Routavaurio- ja kuivatustutkimus, Pituushalkeamat osa I, 1991]. Käytännössä routanousujen ollessa riittävän suuria (huomattavia) pituushalkeamariski kasvaa merkittävästi.

Pituushalkeamat ovat roudan aiheuttamista halkeamista merkittävin tien rakenteellista kuntoa heikentävä vauriotyyppi. Lisäksi epäjatkuvuuskohdat pienentävät rakenteen jäykkyyttä halkeaman ympäristössä ja lisäävät dynaamisten kuormituslisien kautta tierakenteen rasituksia samoin kuin poikisuuntaiset tai vinot halkeamat. Sadevesi pääsee tunkeutumaan halkeamien kautta rakennekerroksiin, mikä lisää ylimääräisen kosteuden aiheuttamia ongelmia ylimmissä sitomattomissa kerroksissa. Halkeaman ulottuessa syvemmälle päällys- ja alusrakenteeseen, veden vaikutuksesta hienoainesta kertyy halkeamaan, minkä seurauksena tierakenne alkaa epähomogenisoidua. Lisäksi tien reunaosan pituushalkeamat pienentävät rakenteen sivusuuntaista stabiiliteettia, mikä puolestaan alentaa rakenteen kuormituskestävyyttä reunalla.

Pituushalkeamien aiheuttamat haitat ovat suurimmillaan roudan sulamiskaudella, jolloin päällysrakenteen kerrokset ovat muutoinkin heikoimmillaan. Tällöin kevytpäällysteisillä teillä halkeaman ympäristössä syntyy paikallisia murtumia ja pysyviä muodonmuutoksia. Tierakenteen sulamiskauden jälkeisessä tiivistymisvaiheessa, kun ylimääräinen vesi on poistunut rakenteesta, halkeamien leveys useimmiten pienenee. Pehmeillä päällysteillä (ÖS, PAB) tien pinnalta havaittavat halkeamat voivat liikenteen tiivistävän vaikutuksen vuoksi näennäisesti jopa kadota kokonaan, mutta siitä huolimatta syvemmällä rakenteessa halkeamat muodostavat pysyvän heikkousvyöhykkeen, joka heijastuu myös uuden päällysteen vaurioina.

Routanousujen aiheuttamat halkeamat ovat osoitus rakenteen routamitoituksen tai routatutkimusten puutteellisuudesta, jos routivaa kohtaa ei ole pystytty paikantamaan oikein. Tien kohdissa, missä esiintyy halkeilua, rakenne ei kykene riittävästi rajoittamaan routanousuja ja pitämään routanousueroja tarpeeksi pieninä.

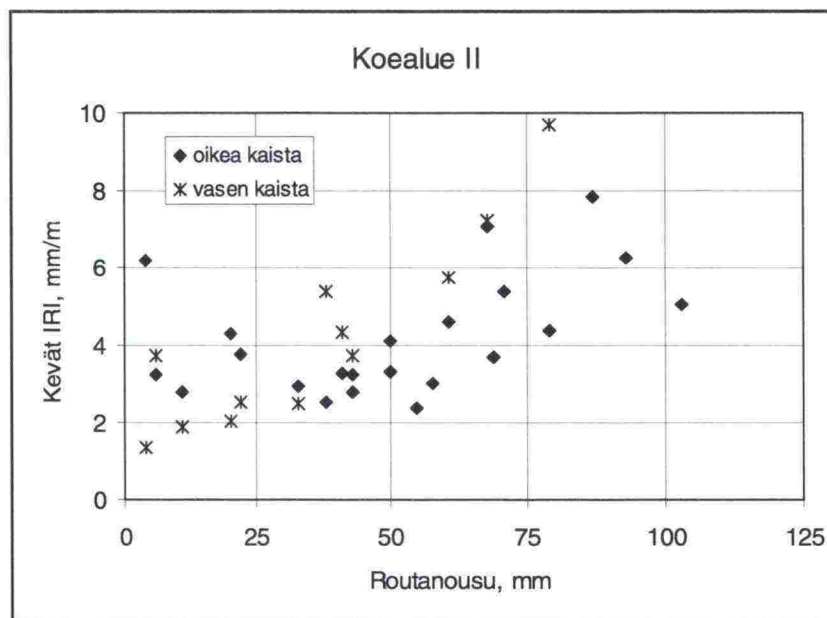
4.3 Pituussuuntainen epätasaisuus (mekanismi)

Tien pinnan pituussuuntaista epätasaisuutta kuvataan yleisesti ns. IRI- arvolla (mm/m). Pituussuuntaisen epätasaisuuden ja routanousujen välillä on selvä riippuvuus, kuten on mm. Kestoikätutkimuksen yhteydessä havaittu (kuva 16).

Keväällä esiintyvä pituussuuntainen epätasaisuus johtuu pääasiallisesti epätasaisista routanousuista. Routanousujen lisääntyessä riski suurten pituussuuntaisten epätasaisuuksien esiintymiselle kasvaa merkittävästi, koska

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

routanousujen epätasaisuus on yleensä sitä suurempaa mitä suurempia routanousut ovat.

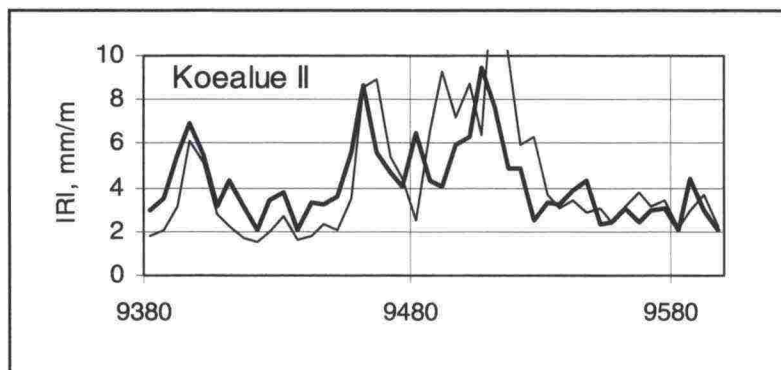


Kuva 16. Routanousut ja pituussuuntaiset epätasaisuudet keväällä 1999. Mt 935 (Kestoikätkutkimus).

Pituussuuntaista epätasaisuutta esiintyy usein myös alusrakenteen ollessa heikko (turve, savi) tai alusrakenteen materiaalin laadun vaihdeltaessa voimakkaasti, jolloin ajan myötä syntyy painumia. Toinen rakenteellinen syy pituussuuntaisten epätasaisuuksien esiintymiselle, vaikkei suuria routanousuja esiintyisikään, on päällysrakenteen vaihtuminen.

Kevytpäällysteisillä teillä tehdyissä tutkimuksissa, vertailtaessa keväällä ja kesällä määritettyjä pituussuuntaisia epätasaisuuksia, on havaittu öljysorapäällysteisten teiden (ns. pehmeät päällysteet) ja asfalttipäällysteisten teiden käyttäytymisen poikkeavan toisistaan. Öljysorapäällysteisille teille on tyypillistä, että keväällä, roudan sulamisaikaan määritetyt ja kesällä, jo sulaneesta ja tiivistyneestä rakenteesta määritetyt pituussuuntaiset epätasaisuudet eivät huomattavasti eroa toisistaan (kuva 17).

Asfalttipäällysteisillä teillä pituussuuntaiset epätasaisuudet ovat keväällä useimmiten selvästi suurempia kuin kesällä eli routanousujen aiheuttamat epätasaisuudet tasoittuvat rakenteen sulaessa ja tiivistyessä. AB- päällyste on jäykempi kuin pehmeät päällysteet. Lisäksi asfalttipäällysteisillä teillä sitomaton päällysrakenne on usein suhteellisen paksu, jolloin päällysrakenne on, varsinkin yläosiltaan, jäykkä ja toimii laattamaisesti. Tällaisen, yhtenä kokonaisuutena toimivan rakenteen kyseessä ollessa routanousujen aiheuttamat epätasaisuudet pääsevät palautumaan paremmin kuin heikommilla rakenteilla roudan sulaessa, eikä päällysrakenteeseen synny kovinkaan huomattavia pysyviä muodonmuutoksia.



Kuva 17. Öljysorapäällysteiseltä tieltä keväällä (paksu viiva) ja kesällä (ohut viiva) määritetyt pituussuuntaiset epätasaisuudet. Mt 935 (Kestoikätutkimus).

Kevytpäällysteisillä teillä päällysrakennekerroksissa tapahtuva deformaatio on voimakkainta keväällä, tierakenteen alkaessa sulaa, jolloin rakenteen kuormituskestävyys heikkenee huomattavasti. Tällöin, tien pinnan epätasaisuuksien seurauksena, liikennekuormitus aiheuttaa rakenteeseen varsin suuria (dynaamisia) sysäyskuormituksia, minkä vuoksi jo sulaneeseen päällysrakenteen osaan syntyy helposti pysyviä muodonmuutoksia. Sulamisrintaman edetessä alusrakenteeseen, myös alusrakenteeseen alkaa muodostua pysyviä muodonmuutoksia sulamispehmenemisen seurauksena. Tienkohdissa, missä routanousut ovat suuria, sulava alusrakenne deformaatioon hyvin herkästi ja voi jopa liukua sulavien jäälinsien päällä. Alusrakenteen ollessa epähomogeeninen deformaatio on myös epätasaisista. Onkin oletettavaa, että suurin osa kesällä esiintyvistä tien pinnan pituussuuntaisista epätasaisuuksista johtuu juuri alusrakenteen epätasaisesta deformaatiosta.

4.4 Poikkisuuntainen epätasaisuus (mekanismi)

Perussyynä tien poikkisuuntaisen epätasaisuuden lisääntymiseen on liikennekuormitus. Poikkisuuntainen epätasaisuus ilmenee ajolinjojen kohdalle syntyvänä urautumisena. Sidotun päällystekerroksen pysyvät muodonmuutokset (tiivistyminen, deformaatio, kuluminen) eivät ole kevytpäällysteisten teiden kokonaisurautumisen kannalta kovinkaan merkityksellisiä, koska päällyste on ohut ja liikenne suhteellisen vähäistä. Hyvin huomattava osa kevytpäällysteisten teiden poikkisuuntaisesta epätasaisuudesta on seurausta heikkolaatuisista tai epähomogeenisista sitomattomista rakennekerroksista ja alusrakenteesta tapahtuvista pysyvistä muodonmuutoksista.

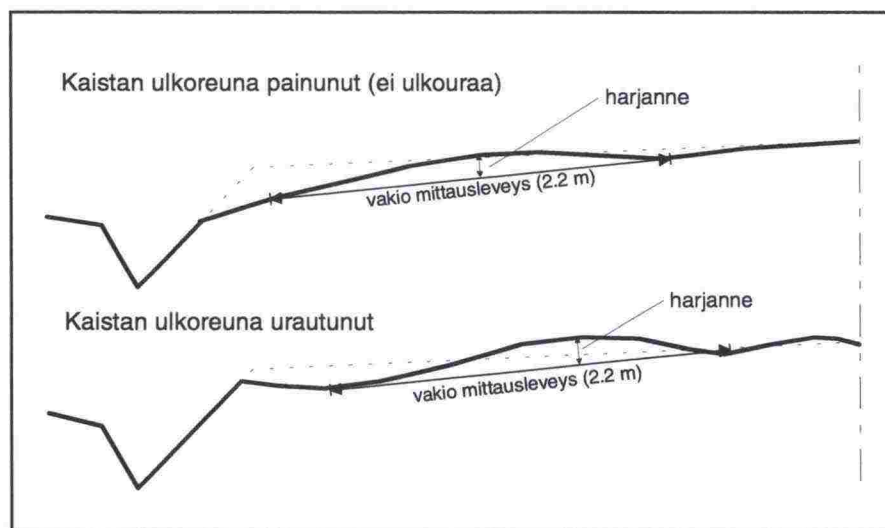
Liikenteen kuormittaessa tierakennetta materiaali pyrkii siirtymään ajourien kohdalla alaspäin samalla syrjäyttäen vieressä olevaa materiaalia sivulle. Syrjäytyvä materiaali liikkuu sivulle ja ylöspäin pienintä vastusta kohden. Tienreunan puoleinen osa materiaalista liikkuu pääasiassa vaakasuunnassa, mutta tien keskiosissa osa materiaalista pyrkii nousemaan myös ylöspäin. Vaakasuuntaisten pysyvien muodonmuutosten seurauksena tie leve-

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

nee. Urautuminen on puolestaan seurausta ajourien kohdalla tapahtuvasta painumisesta sekä ajourien välissä tapahtuvasta materiaalin kohoamisesta. Tien levenemisen ja urautumisen välillä on selvä yhteys. Molemmat vaurioitumismekanismit liittyvät tierakenteen pysyviin muodonmuutoksiin. Mitä helpommin materiaali siirtyy vaakasuunnassa sitä nopeampaa on tien urautuminen.

Poikkisuuntaista epätasaisuutta on yleisesti kuvattu PTM-autolla määritetyllä ajokaistan ulkouran syvyydellä. Kevytpäällysteisille teille on tyypillistä, että päällystetty piennar on kapea tai sitä ei ole lainkaan, minkä vuoksi liikennekuormitus välittyy rakenteeseen lähellä tien reunaa aiheuttaen reunaosassa painumista. Tällöin urautuminen ei ilmene kokonaisuudessaan ulkouran syvyyksissä. PTM-autolla määritetyt ulkouran syvyydet ovatkin hyvin usein osoittautuneet arvoiltaan pieniksi tai negatiiviseksi. Ajolinjan vaihteluista ja tien poikkileikkauksen kuperuudesta johtuen ulkouran syvyys on kapeilla teillä osoittautunut epäluotettavaksi poikkisuuntaisen epätasaisuuden kuvaajaksi.

Ajourien välisen harjanteen korkeus on kapeilla teillä selvästi parempi poikkisuuntaisen epätasaisuuden tunnusluku kuin ulkouran syvyys (kuva 18). Kun poikkisuuntaisen epätasaisuuden arvioimiseksi määritetään suurin kaistalla oleva harjanteen korkeus vakioleveydellä (esim. ajourien välinen leveys ~ 2.2 m), ei tien reunan painumisesta aiheudu vääristymää mittaus tuloksiin. Tällä tavalla määritetty harjanteen korkeuden arvo on käytännössä aina positiivinen, minkä vuoksi mittaus tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia, huolimatta siitä, onko kaistalla selvä ulkoura tai ei.



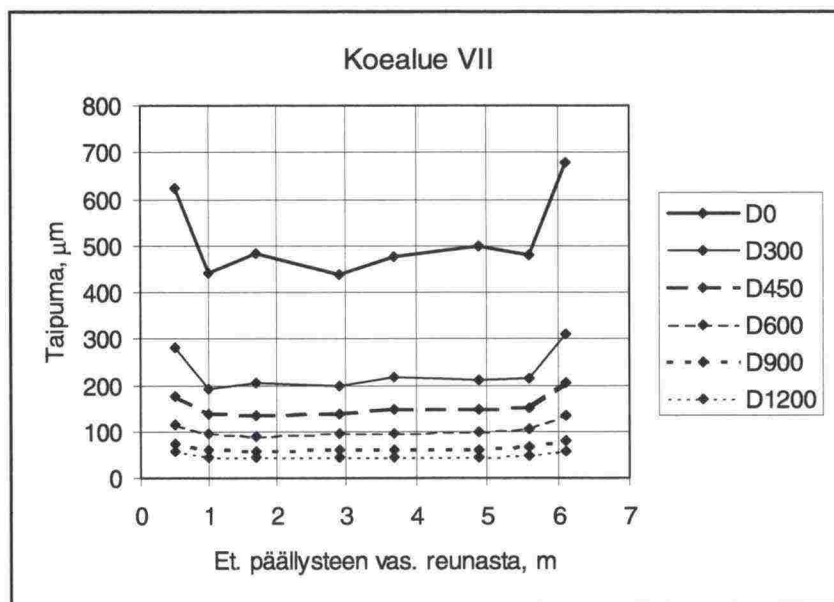
Kuva 18. Harjanteen korkeuden määrittämisperiaate.

Erityisesti kapeilla teillä levenemis- ja urautumismekanismit eivät havaittavasti hidastu iän myötä vaan vaurioituminen jatkuu vuosittain säännöllisesti. Vaurioitumisen kasvunopeus riippuu tierakenteen ominaisuuksista ja olosuhteista. Kevytpäällysteisillä teillä liikennekuormituksen aiheuttamat rasi-

tukset ovat huomattavan suuret sitomattomissa rakennekerroksissa ja kaikki rakennekerrokset voivat olla vaurioitumisen kannalta kriittisiä. Materiaaliominaisuudet ja niiden muuttuminen sekä olosuhteet (mm. pohjaveden korkeus, rakenteen kuivatus) vaikuttavat selvästi enemmän pysyvien muodonmuutosten syntymiseen päällysteen ollessa ohut kuin paksupäällysteisillä teillä. Levenemisen seurauksena myös sidotut kerrokset heikkenevät, koska paikallisesti päällysteeseen syntyy suuria, lähinnä vaakasuuntaisia, muodonmuutoksia.

Lisäksi poikkisuuntaisen epätasaisuuden muodostuminen riippuu voimakkaasti alusrakenteen laadusta ja olosuhteista. Alusrakenteen ollessa heikko poikkisuuntaisen epätasaisuuden kasvu on nopeaa. Hyvä alusrakenne puolestaan vähentää urautumista selvästi. Alusrakenne vaikuttaa routanousuihin ja -eroihin. Routanousut ja niiden epätasaisuus (dyn. lisäkuormitus) ovat siis osatekijänä myös poikkisuuntaisen epätasaisuuden muodostumisessa.

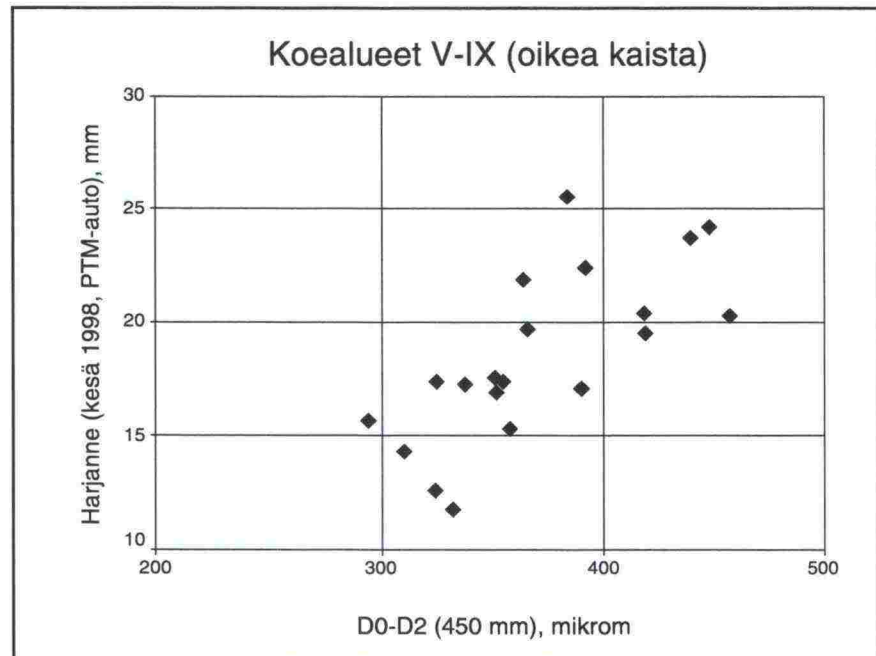
Poikkisuuntaisen epätasaisuuden suuruuteen vaikuttaa selvästi tien poikkileikkauksen geometria, mm. tien leveys, luiskan kaltevuus ja sivuojan syvyys. Geometrian ollessa puutteellinen, myös rakenteen sivusuuntainen tuki on riittämätön ja kuormituskestävyys pienenee tien reunaosissa. Pudotuspainolaitemittausten perusteella rakenteen reunan maksimitaipumat (D0) ovat selvästi suurempia kuin muualla poikkileikkauksessa (kuva 19).



Kuva 19. Tierakenteen keskimääräiset ($n=5$) taipumat pudotuspainolaitteella. Kt 81 (Kestoikätutkimus).

Myös muut taipumat (D300...D1200) ovat tien reunaosalla (0.5 m päällysteen reunasta) suurempia kuin muualla poikkileikkauksessa, mikä osoittaa, että reunan heikentävä vaikutus ulottuu varsin syvälle tierakenteeseen. Taipumien kasvamisella on selvä yhteys tien urautumiseen. Tutkimusten perus-

teella esimerkiksi päällysrakenteen yläosan ominaisuuksia kuvaavan taipumaeron D0-D2 (SCI450) lisääntyessä myös harjanteen korkeus kasvaa merkittävästi (kuva 20). Samankaltainen riippuvuus on havaittu myös harjanteen korkeuden sekä D0- ja D5- taipumien välillä.



Kuva 20. Taipumaero D0-D2 (SCI 450) ja harjanteen korkeus. Kt 81 (Kestoikä tutkimus).

Kapeilla teillä rakenteen sivutuen puuttumisella on merkittävä vaikutus varsinkin poikkisuuntaisen epätasaisuuden muodostumiseen. Tien kohdissa, missä rakenteen sivusuuntainen stabiliteetti on rakenteen geometrian vuoksi hyvä myös levenemisen ja urautumisen lisääntyminen iän funktiona on vähäistä.

5 MITOITUSMENETTELYN KEHITTÄMISEN HYPOTEESEIT

5.1 Mitoittavat vauriot ja mitoituksen kehittämisen osavaiheet

Mitoittavat vauriot

Mitoitusmenettelyllä pyritään ennustamaan seuraavan tyyppisten kevytpäälysteisten teiden toimintaan oleellisesti vaikuttavien vaurioiden syntymistä:

1. Roudan aiheuttamat halkeamat
2. Pituussuuntainen epätasaisuus
3. Poikkisuuntainen epätasaisuus

Roudan aiheuttamat halkeamat ovat pääosin pituussuuntaisia halkeamia. Alusrakenteen vaihteluista johtuen osa roudan aiheuttamista halkeamista saattaa olla vinoja tai poikkitaaisia halkeamia. Tierakenteen toiminnan kannalta pituushalkeamat ovat yleensä kaikkein tärkeimmät kaikista halkeamista, mistä syystä mitoitusmenettelyn kehittämisessä keskitytään pituushalkeamiin.

Pituussuuntainen epätasaisuus on tien palvelutason kannalta kaikkein tärkein tekijä, mistä syystä sen sisällyttäminen kevytpäälysteisten teiden mitoitusmenettelyyn on välttämätöntä. Toinen palvelutasoon oleellisesti vaikuttava tekijä on *poikkisuuntainen epätasaisuus*. Poikkisuuntaista epätasaisuutta kuvataan ajourien välisellä harjanteen korkeudella. Kevytpäälysteisillä teillä osittain samat tekijät vaikuttavat sekä poikkisuuntaiseen epätasaisuuteen että verkkohalkeiluun, mistä syystä myös verkkohalkeamat tulevat eräällä tapaa mukaan mitoitukseen. Päälysteen väsymisestä johtuva verkkohalkeilu ei ole mitoittava tekijä kevytpäälysteisillä teillä. Jatkossa Kevytpäälysteisten teiden –projektissa painopiste tulee olemaan pituussuuntaisen ja poikkisuuntaisen epätasaisuuden tarkasteluissa, koska suurimmat tiedonpuutteet liittyvät juuri näihin kahteen vauriotyyppiin.

Maapohjan kokoonpuristumisesta johtuvien epätasaisuuksien osalta mitoitusmenettely tulee soveltuvin osin noudattamaan TPPT:n lähestymistapaa.

Lisäksi tulisi mitoituksessa ottaa huomioon edellä mainittujen *vauriotyyppien yhteisvaikutukset*. Kuivatus vaikuttaa kaikkiin edellä mainittuihin vauriotyypeihin. Sen huomioonottaminen mitoitusmenettelyssä saattaa aiheuttaa merkittäviä vaikeuksia. Kuivatuksen tulisi olla periaatteessa kunnossa, jotta tierakenteet toimisivat arvioidulla tavalla koko mitoitusajan.

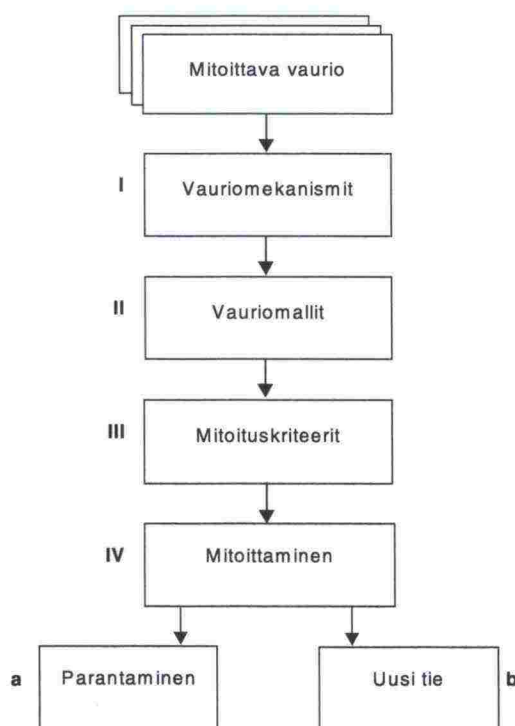
Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

Myös päällystetekniset asiat vaikuttavat tien palvelutasoon, mutta niitä ei käsitellä tässä yhteydessä, koska tarkastelu rajataan koskemaan ainoastaan rakenteellista mitoitusta.

Liitteessä 4 esitetään yhteenvedonomaisesti kaavioita apuna käyttäen kevytpäällysteisen tierakenteen parantamisen hypoteettiset mitoitusmenettelyt.

Mitoitusmenettelyn kehittämisen osavaiheet

Kevytpäällysteisten teiden mitoitusmenettelyn kehittäminen sisältää kunkin vauriotyyppin osalta neljä eri vaihetta (kuva 21). Ensimmäisessä vaiheessa kuvataan *vauriomekanismit* vaikuttavine tekijöineen vähintäänkin sillä tarkkuudella, kuin käytännön mitoituksessa on mahdollista ottaa huomioon. Toisessa vaiheessa pyritään luomaan kenttäaineistoihin ja tarvittaessa simulointikokeisiin pohjautuen *vauriomallit* (vaurioitumisnopeudet), joissa on mahdollisuuksien mukaan otettu huomioon kaikki oleellisesti vaikuttavat tekijät. Kolmannessa vaiheessa arvioidaan ja tarvittaessa tarkistetaan kunkin vauriotyyppin osalta nykyisin käytettävissä olevat *sallitut raja-arvot*. Neljännessä vaiheessa tarkastellaan kunkin vauriotyyppin osalta mitoittamista ainakin sillä tarkkuudella, että kaikki oleelliset osatekijät tulevat mukaan, sekä esitetään *hypoteettiset mitoitusmenetelmät* koskien sekä parantamista että uuden tien tekemistä.



Kuva 21. Mitoitusmenettelyn kehittämisen osavaiheet.

Käytännön mitoittaminen kunkin vauriotyyppin osalta sisältää neljä eri vaihtetta:

- lähtötietojen hankinta
- rakennevaihtoehtojen valinta
- rakennevaihtoehtojen vertailu mitoittamalla
- rakenteen valinta

Parantamishankkeilla lähtötiedot kuvaavat lähinnä parannettavan tien nykyistä toiminnallista ja rakenteellista kuntoa. Uuden tien osalta lähtötietojen hankinnassa sovelletaan samoja periaatteita kuin paksuilla AB-päälysteisillä teillä (TPPT-projekti). Käytännössä kevytpäälysteisillä teillä lähtötietojen kattavuus ja laatu ovat rajoitetumpia kuin korkealaatuisempia teitä käsittelevässä TPPT-projektissa. Tarvittavat lähtötiedot tulee täsmentää projektin aikana.

Alustaviksi rakennevaihtoehtoiksi pyritään valitsemaan rakenteet, jotka tehokkaimmin rajoittavat tai hidastavat kevytpäälysteisten teiden toimintaan oleellisesti vaikuttavien vaurioiden syntymistä.

Varsinaisessa rakenteen mitoittamisessa etsitään sellaiset, teknisesti toimivat rakenteet, joiden osalta mitoituskriteerit suunnitteluajanjaksona eivät ylitä.

Lopullinen rakenteen valinta perustuu teknistaloudellisiin vertailuihin, mitä ei käsitellä tämän projektin puitteissa.

Kevytpäälysteisiä tierakenteita tarkasteltaessa maa jaetaan vähintään kolmeen eri ilmastoalueeseen. Pakkasmäärän osalta valitaan esim. kerran 10 vuodessa sattuva maksimi pakkasmäärä mitoituksen perustaksi.

5.2 Roudan aiheuttamat pituushalkeamat

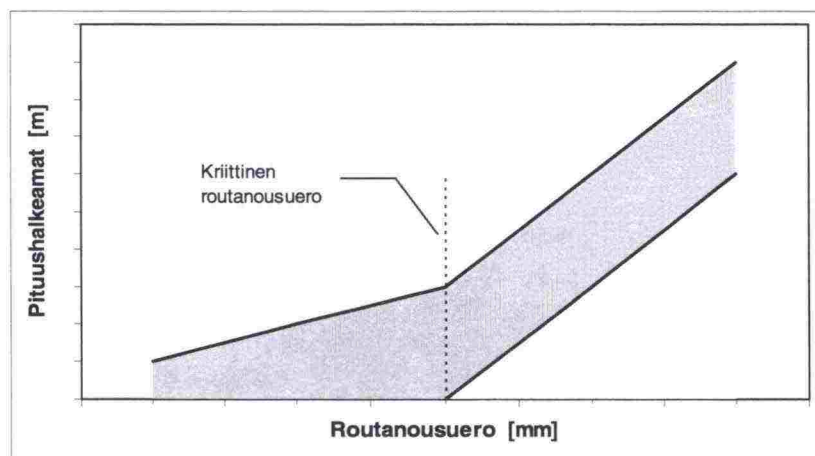
Vauriomekanismit

Roudan aiheuttamat pituushalkeamat johtuvat epätasaisesta routanoususta tien poikkisuunnassa, jolloin syntyy vetojännityksiä ja -muodonmuutoksia päällysrakenteen yläosaan. Raskaudet riippuvat siitä, kuinka suuria ovat routanousun epätasaisuudet eli kuinka suuria kulmanmuutoksia routanousu synnyttää tien pintaan. Noin 7 m leveällä tiellä pituushalkeama muodostuu tyypillisesti tien keskiosalle. Sen sijaan kapeilla teillä pituussuuntaiset roudahalkeamat syntyvät yleensä tien reunoille. Tällöin routimisen epätasaisuudesta huolimatta jäätynyt tierakenne toimii ajoradan alueella yhtenäisenä laattana, jolloin halkeamat syntyvät muodostuneen laatan ja ulkopuolisen alueen rajakohtiin eli tien reunoihin.

Vauriomallit

Vauriomalleilla kuvataan pituushalkeamariskiä routanousueron ja/tai routanousun avulla. Vauriomalleja käytetään rakennevaihtoehtojen pituushalkeamien esiintymistodennäköisyyden arviointiin mitoitusvaiheessa. Jos rakennevaihtoehdolla pituushalkeamariski muodostuu vauriomallin perusteella liian suureksi, on rakennetta joko muutettava siten, että vaihtoehto täyttää asetetun kriteerin, tai vaihtoehto hylätään.

Kriittistä routanousueroa (kulmanmuutosta) tai routanousua suuremmilla arvoilla pituushalkeamariski lisääntyy selvästi (kuva 22). Koska käytännössä routanousuero kasvaa routanousun lisääntyessä, myös tien keskiosan pituussuuntaisten routahalkeamien määrän ja routanousujen suuruuden välillä on riippuvuutta.



Kuva 22. Routanousueron ja tien keskiosan pituushalkeamien määrän välinen hypoteettinen riippuvuus.

Vauriomallien tulee pohjautua riittävän kattaviin kenttähavaintoihin eli mitattuihin routanousuihin ja niistä määritettyihin routanousueroihin sekä vastaaviin pituushalkeamiin. Suurimmat puutteet esim. KURRE-aineiston hyödynnettävyydestä johtuvat routanousumittausten puuttumisesta. Käyttökelpoisia tutkimuksia ovat mm. VTT:n tekemät katujen vaurioitumista koskevat selvitykset sekä Insinööritoimisto PSV:n tekemä Routavaurio- ja kuivatustutkimus. Lisäaineistoa saadaan myös Kevytpäällysteisten tierakenteiden- projektiin liittyvistä kenttämittauksista.

Mitoituskriteerit

Mitoituskriteerit toimivat vaurioitumista (pituushalkeamat) kuvaavien selittäjien (routanousuero ja/tai routanousu) raja-arvoina. Raja-arvot edustavat suurinta hyväksyttävää halkeamariskiä mitoitusvaiheessa.

Mitoituskriteerit määritetään empiirisin päätelmin soveltaen TPPT-projektissa paksuille AB-päällysteisille teille määritettyjä arvoja, joita joudutaan vielä nykyisestä tarkentamaan. TPPT-projektissa kriittinen routanousuero ja routanousu on määritetty segregaatiopotentiaaliteoriaan pohjautuvilla laskelmilla. AB-teille määritetyt raja-arvot tulee verifioida kenttäaineistolla kevytpäällysteisille teille sopiviksi. Käytännössä kriittinen routanousuero riippuu ainakin tien leveydestä.

Toinen kriittisen routanousun suuruuden valintaan vaikuttava tekijä on vaadittava tien palvelutaso (ajomukavuus), joka on myös otettava huomioon routanousun suuruutta arvioitaessa, koska routanousut ja varsinkin niiden erot tien pituussuunnassa vaikuttavat palvelutasoon. Routanousuerojen suuruus riippuu myös tien pituussuunnassa voimakkaasti routanousun suuruudesta.

Mitoittaminen

Lähtötietojen hankinta

Parantamishankkeilla roudan aiheuttamien pituushalkeamien mitoittamisen lähtötietoina tarvitaan roudan aiheuttamat pituushalkeamat, routanousut, parannettava tierakenne ja ilmastotiedot. Pituushalkeamien merkitys tierakenteen toimintaan riippuu halkeamaleveydestä ja mahdollisesta porrastumisesta sekä myös halkeaman sijainnista. Leveyden perusteella halkeamat tulee luokitella vähintään kolmeen vaikeusasteeseen esim. seuraavasti:

- alle 5 mm (hiushalkeamat)
- 5 - 30 mm (keskimääräiset halkeamat)
- yli 30 mm (leveät halkeamat)

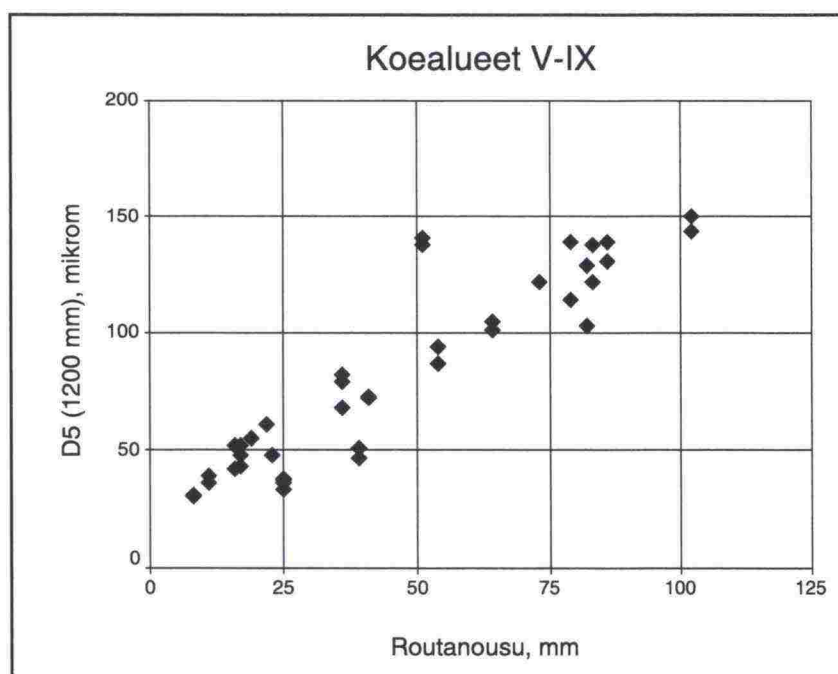
Halkeamien vaikeusasteen tunteminen helpottaa rakennevaihtoehdon valintaa. Halkeamien inventointi tehdään keväällä, jolloin ne ovat leveimmillään. Käytännön routavaurioiden tunnistamisen menettelyä tulee kehittää.

Parannettava tierakenne tulisi tuntea pituushalkeamakohdissa ja myös potentiaalisissa pituushalkeamakohdissa. Potentiaalisina voidaan pitää kohtia, missä on suuret routanousuerot ja/tai routanousut, vaikka ei esiintyisikään pituushalkeamia. Vanha tierakenne (routimattomien kerrosten paksuus) voidaan määrittää joko vanhojen suunnitelmien, maatulokaluotausten tai arvioiden perusteella. Yleensä vanhojen suunnitelmien tarkkuus (routimattomien kerrosten paksuus) on riittävä routalaskelmien kannalta. Jos suunnitelmia ei ole, kuten esim. rakentamattomat tiet, maatulokaluotauksella voidaan määrittää routimattomat kerrokset kohtuullisen tarkasti. Käytännössä, jos routanousut ovat suuria, päällysrakenne ei ole kovinkaan paksu. Tällöin voitaneen käyttää myös arvioitua päällysrakennepaksuutta.

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

Routanousut tulisi määrittää parannettavilla teillä vaaituksin tai merkittävästi routivilla alueilla GPS-mittauksin tarvittaessa muilla mittauksilla täydentäen. Mikäli routanousua ei parantamiskohteella mitata, voidaan paksuilla AB-päällysteisillä teillä käyttää hyväksi PTM-mittausten vertailua routimisherkkien kohteiden tunnistamiseen. Tulkinta tehdään kevään ja kesän mittauksen erotuksena vertaamalla pituusprofiilin pintamuodon vääristymien eroja yli 2 m aallonpituusalueella. Kevytpäällysteisillä teillä, joilla routanousuerot voivat jäädä osittain pysyviksi, menettely vaatii lisäselvityksiä.

Routanousuero- ja/tai routanousukohtia voidaan karkeasti arvioida myös suoraan IRI-arvojen perusteella (kohta 5.3). Viiden metrin matkalta määritetty IRI-arvo on osoittautunut hyväksi routakohtien paikantamisessa. Periaatteessa myös routanousuilla ja pudotuspainolaitteella määritetyillä D5-taipumilla saattaa olla on keskinäistä yhteyttä. Samat tekijät, kuten alusrakenteen materiaali, olosuhteet (pohjavesi) ja päällysrakenteen paksuus, vaikuttavat sekä routanousuihin että D5-taipumiin. Erällä Kestoikätkutkimuksen koealueilla routanousut ja kesällä (tierakenne täysin sula) määritetyt D5-taipumat korreloivat selvästi keskenään (kuva 23). Asia kaipaa kuitenkin käytännön mittauksiin perustuvaa verifiointia.



Kuva 23. Routanousut ja D5-taipumat Kestoikätkutkimuksen koealueilla V-IX.

Uuden tien routamitoitusta varten suunniteltava tielinja jaetaan tasalaatuisiin osa-alueisiin, joille arvioidaan routimiskerroin. Jako tasalaatuisiin alueisiin tehdään käyttäen hyväksi alueen geologiatietoja, kartta-aineistoa, ilmakuvia ja pohjatutkimustietoja. Pengerosuuksia varten tarvitaan vastaavat tiedot pengertäytteen ottopaikoilta. Jako tehdään pohjamaan/alusrakenteen savi-

pitoisuuden mukaan käyttäen hyväksi rakeisuustietoja sekä savipitoisuus-routimiskerroin vuorosuhdetta.

Rakennevaihtoehdot

Pituushalkeamakohtien suhteen parantamisen rakennevaihtoehdot ovat periaatteessa seuraavat:

- routimattomien kerrosten lisääminen (routanousujen pienentäminen)
- massanvaihto (routanousujen pienentäminen)
- lämpöeriste (routanousujen pienentäminen)
- vahvisteet (päällysrakenteen lujittaminen)
- alusrakenteen homogenisointi (routivuuden vähentäminen)

Käytännössä jouduttaisiin käyttämään paksuja lisäkerroksia, jos pelkästään niillä pyrittäisiin estämään pituushalkeamien heijastuminen parannettuun tierakenteeseen. Tämä johtuu ensinnäkin siitä, että pituushalkeamat ulottuvat yleensä lähes koko routaantuvaan kerrokseen. Tällöin tierakenteessa on heikkousvyöhyke, mitä kerrosten lisääminen ei poista. Jos puolestaan routimista rajoitetaan massanvaihdolla, joudutaan ne varsinkin Pohjois-Suomessa tekemään syviksi.

Lämpöeriste on tehokkain routimisen rajoittamiskeino, mutta sen käyttö edellyttää olemassa olevan päällysrakenteen osittaista poistamista. Lämpöeristetty rakenne on mitoittettava myös kuormituskestävyyden suhteen. Ehkä halvin keino vähentää pituushalkeamia on käyttää vahvistetta sitomattomassa kantavassa kerroksessa.

Alusrakenteen homogenisoinnilla voidaan poistaa (alusrakenteen) kerroksellisuutta, mikä tasaa ja myös yleensä pienentää jonkin verran routanousuja. Alusrakenteen homogenisoinnilla voidaan periaatteessa pienentää jonkin verran tarvittavien routimattomien kerrosten yhteispaksuutta. Varsinaisesti alusrakenteen homogenisointi (kivien poistaminen) liitetään yleensä pituussuuntaisen epätasaisuuden vähentämiseen uusilla teillä, mutta sitä käytetään myös parantamishankkeilla.

Varsinainen mitoittaminen

Pituushalkeamien mitoittaminen perustuu rakennevaihtoehdon laskennallisiin poikkisuuntaisiin routanousueroihin ja/tai routanousuihin, joita verrataan vauriomalleihin ja mitoituskriteereihin (raja-arvoihin). Routanousujen ja niiden erojen määrittämiseksi tarvitaan alusrakenteen SP (routimiskerroin). SP määritetään parantamishankkeella (takaisinlaskennalla) vanhan tierakenteen kerrospaksuuksien, mitatun routanousun ja pakkasmäärän avulla. Uuden tien osalta alusrakenteen routimiskertoimen arvioinnissa sovelletaan samoja periaatteita kuin (paksuilla) AB-päällysteisillä teillä.

Rakennevaihtoehdon routanousut ja routanousuerot määritetään takaisinlasketun SP, vaihtoehdon kerrospaksuuksien ja mitoituspakkasmäärän tai tavoiteltavan kestoiän aikana tietyllä todennäköisyydellä toteutuvan pakkasmäärän avulla. Varsinaiset routamitoituslaskelmat eivät kuulu tähän projektiin.

5.3 Pituussuuntainen epätasaisuus

Vauriomekanismit

Kevytpäälysteisten tierakenteiden pituussuuntainen epätasaisuus johtuu pääasiassa routanousuista ja niiden epätasaisuudesta sekä toissijaisesti liikennekuormituksesta. Ainakin PAB-O teillä IRI-arvot ovat keväällä ja kesällä numeroarvoiltaan hyvin lähellä toisiaan. Syyt epätasaisuuteen ovat erilaiset: keväällä routanousut ja niiden epätasaisuus, kesällä pysyvät muodonmuutokset.

Keväällä tierakenteen alkaessa sulaa tien pinnan epätasaisuudet aiheuttavat tiehen varsin suuria dynaamisia kuormituslisäjä, jolloin sulavaan päällysrakenteeseen syntyy helposti pysyviä muodonmuutoksia. Sulamisen edistytessä myös alusrakenteeseen alkaa muodostua pysyviä muodonmuutoksia. Kohdissa, missä on suuria routanousuja, sulava alusrakenne deformoituu hyvin herkästi. Alusrakenteen ollessa epähomogeeninen deformaatio on myös epätasaisista. Suuri osa kesällä olevista tien pinnan pituussuuntaisista epätasaisuuksista johtunee juuri alusrakenteen epätasaisesta deformaatiosta.

Alusrakenteen ja pohjamaan kokoonpuristumisesta johtuvia painumia ja painumaeroja ei käsitellä yksityiskohtaisesti tässä projektissa.

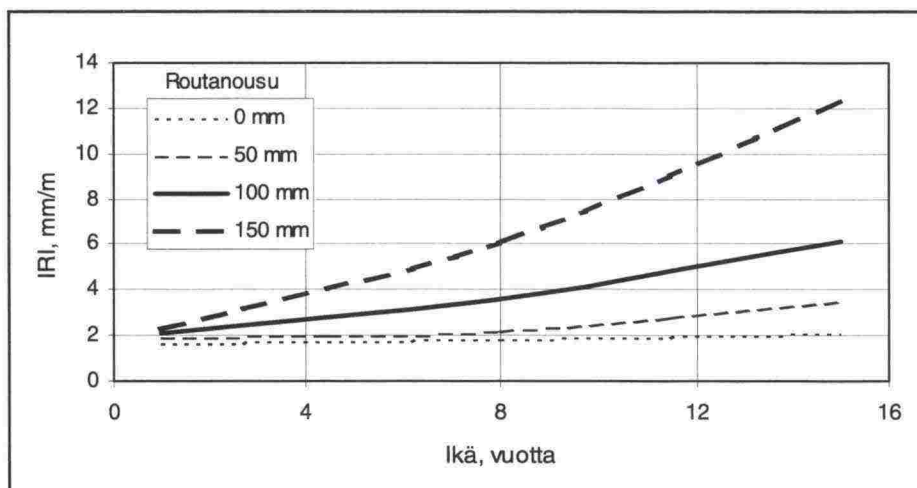
Vauriomallit

Pituussuuntaisen epätasaisuuden vauriomalleilla kuvataan epätasaisuuden kehittymistä ajan suhteen. Epätasaisuusmalleja käytetään alustavien rakennevaihtoehtojen kestoiän arviointiin mitoitusvaiheessa. Jos kestoikä muodostuu liian lyhyeksi, vaihtoehto hylätään.

PAB-O -päällysteisillä Kestoikätkimoksen koealueilla pituussuuntaiset epätasaisuudet ovat lisääntyneet 10 vuoden aikana sitä enemmän mitä suuremmat routanousut ovat. Routanousujen ollessa vähäisiä IRI-arvot eivät ole juurikaan lisääntyneet. Pituussuuntaista epätasaisuutta on toki myös alusrakenteen vaihtumiskohdissa, vaikkei esiintyisikään suuria routanousuja. Raskaan liikenteen määrä ja mahdollisesti myös päällysrakenteen yläosan ominaisuudet vaikuttavat pituussuuntaisen epätasaisuuden lisääntymiseen. Ilmeisesti mitä enemmän on raskasta liikennettä sen nopeampaa on epätasaisuuden kasvu. Tavanomaisella kevytpäällysteisellä tierakenteella sitomat-

toman kantavan kerroksen ominaisuuksilla on myös merkitystä, jos kantavan kerroksen materiaali on esim. herkkä vedelle.

Vauriomalleihin tulisi sisällyttää ainakin routanousujen suuruus ja raskaan liikenteen määrä, mahdollisesti jokin rakennetta kuvaava tekijä sekä aikatekijä. Routanousujen ja pituussuuntaisen epätasaisuuden lisääntymisen välinen yhteys saattaisi olla esim. kuvan 24 kaltainen.



Kuva 24. Hypoteettinen arvio routanousun merkityksestä pituussuuntaisen epätasaisuuden lisääntymiseen iän funktiona.

Routanousujen suuruutta voidaan kevytpäällysteisillä ja ohutpäällysrakenteisilla teillä karkeasti arvioida pudotuspainolaitteella kesällä määritetyn D5 (1200 mm) -taipuman avulla, jos routanousujen ja D5-taipuman välillä on riittävän selvä yhteys. Tällöin arvio pituussuuntaisen epätasaisuuden lisääntymisestä routanousujen vaikutuksesta iän funktiona olisi helposti verifioitavissa KURRE ja muiden kenttäaineistojen avulla.

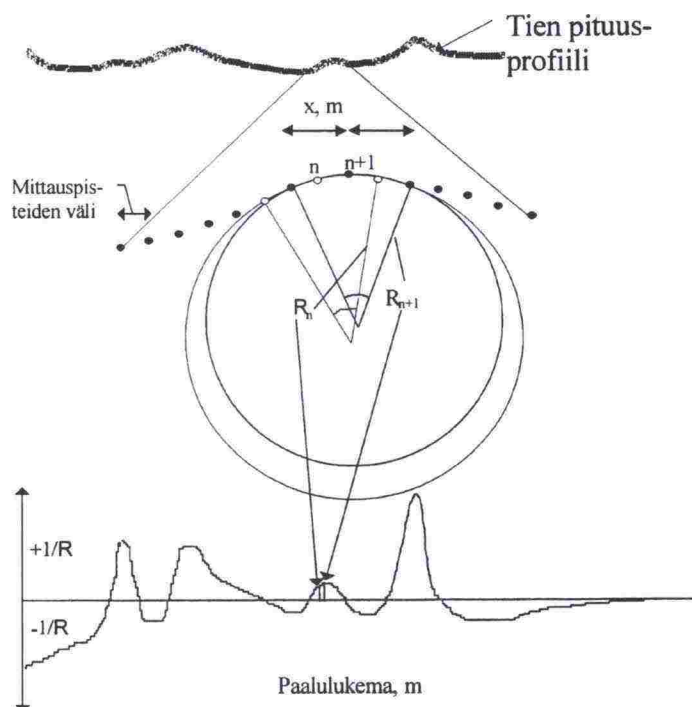
Jos routanousujen ja kesällä määritetyn D5-taipuman välillä ei ole riittävän selvää yhteyttä, joudutaan routanousujen ja pituussuuntaisten epätasaisuuksien väliset riippuvuudet johtamaan routanousujen avulla. Jos tähän malliin päädytään, kenttäaineistot tulisi täydentää routanousujen mittauksilla. Pituussuuntaisen epätasaisuuden ja routanousujen välisiä yhteyksiä on selvitetty mm. Kestoikä tutkimuksessa ja Hanketaso vaurioanalyysin kehittäminen -tutkimuksessa. Routanousuja tulisi määrittää myös Kevytpäällysteisten tierakenteiden -projektiin liittyvissä kenttämittauskohteissa.

Pituussuuntaisen epätasaisuuden lisääntymistä voidaan hanketasolla parantamiskohteilla arvioida myös ns. ympyränkaaren sovitusmenetelmällä, suorittamalla PTM-mittauksia muutamina vuosina ennen parantamishankkeen käynnistymistä. Menettelyllä voidaan tunnistaa tienkohdat, joissa pituussuuntainen epätasaisuus lisääntyy sekä periaatteessa erottaa routimisesta ja painumisesta johtuvat epätasaisuudet. Lisäksi ympyränkaaren so-

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

vitusmenetelmällä voidaan likimääräisesti arvioida tiehen kohdistuvia rasi-
tuksia.

Ympyränkaaren sovitukseen menetelmässä tien pituussuuntaiseen profiiliin sovi-
tetaan leikkaava ympyränkaari valitsemalla mitatuista profiilin pisteistä kolme
toisistaan vakioetäisyydellä olevaa pistettä (kuva 25). Pisteiden kautta sovi-
tetaan kulkemaan ympyränkaari, jonka säteen pituus ratkaistaan. Säteen
käänteisluku - $1/R$ eli kaarevuus - kuvaa tien tasaisuutta keskimmäisen pis-
teen kohdalla.

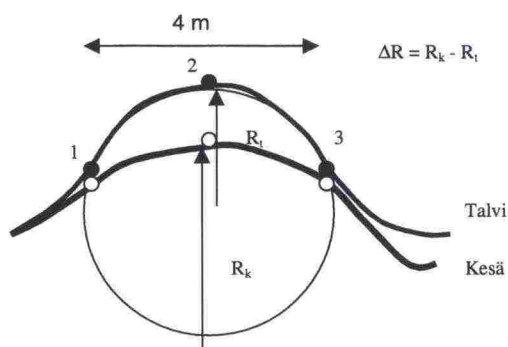


Kuva 25. Ympyränkaaren sovituksen periaate.

Tienpinnan "jatkuva" kaarevuuskuvauksa saadaan ratkaisemalla kaarevuus
kaikista tien pituussuuntaisen profiilin pisteistä. Mitä pienempi kaarevuus on,
eli mitä suurempi on sovitetun ympyrän säde, sitä tasaisempi tie. Sopivaksi
menettelyksi routaepätasaisuuden tunnistamiseen on osoittautunut toisis-
taan noin 2 m välein olevien pisteiden kautta kulkevan ympyränkaaren so-
vittaminen (kuvassa 25 $x = 2$ m). Painuman suhteen tehtävässä tarkastelus-
sa pisteiden väli on syytä valita suuremmaksi, jopa 10 metriksi.

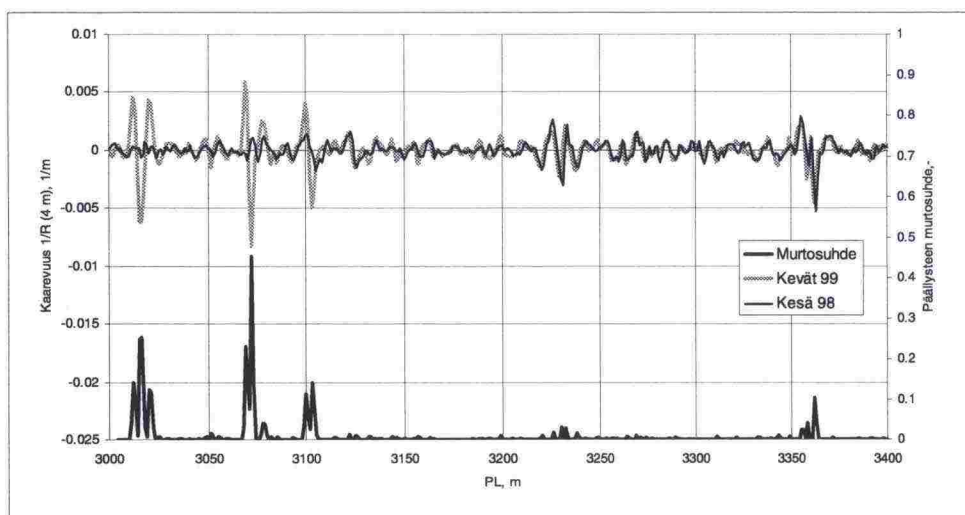
Pituussuuntaisen epätasaisuuden kehittymistä ajan suhteen tarkastellaan
ympyränkaaren sovitukseen menetelmässä vähentämällä eri ajankohtina tehdyt
mittaustulokset toisistaan (kuva 26). Eri ajankohtina tehtyjen mittausten pe-
rusteella voidaan arvioida esim. routanousujen merkitystä poikkihalkeamien
syntymiseen. Jos hypoteettisesti arvioidaan, että routanousun aikaansaama
poikkihalkeama syntyy 50 % todennäköisyydellä, kun routanousuero 8 m
matkalla saavuttaa arvon 50 mm, päästään kiinni kaarevuuden muutokseen.

Edellä mainitut arvot vastaavat kaarevuussäteen arvon muutosta $\Delta R = 160$ m ja kaarevuuden muutosta $\Delta 1/R = 0.0625$. Nämä arvot puolestaan vastantsevat 0.1 ‰ päällysteen venymää (suhteellinen päällysteen tason suuntainen venymä $\varepsilon = 0,0001$). Käytännössä päällysteen venymän merkitystä voidaan arvioida murtosuhteen $\varepsilon/\varepsilon_{\text{murto}}$ avulla.



Kuva 26. Tien pinnan venymä kesän tilanteesta (valkoiset ympyrät) talven tilanteeseen (mustat ympyrät). Tien pinnan venymä 4 metrin matkalla on talven kaaren 1-2-3 pituus vähennettynä kesän kaaren 1-2-3 pituudesta. Venymä $\varepsilon = [(1-2-3_{\text{talvi}} - 1-2-3_{\text{kesä}})/1-2-3_{\text{kesä}}]$. Murtovenymäksi oletetaan $\varepsilon_{\text{murto}} = 0,0001$. Murtosuhte $= \varepsilon/\varepsilon_{\text{murto}}$.

Esimerkkinä ympyränkaaren sovitusten menetelmästä on tehty vertailu paksulla AB-päällysteisellä tiellä suoritettujen kevät ja kesämittauksen avulla (kuva 27). Kaarevuuksien muutoksille on lisäksi laskettu murtosuhte.



Kuva 27. Esimerkki PTM-mittauksiin pohjautuvasta ympyränkaarisovelluksesta paksupäällysteisellä AB-tiellä.

Eriaikaisten pituusprofiilien vertailtavuus edellyttää suurta tarkkuutta mittauksen paikantamisessa. Myös eri PTM-autojen kesken saattaa esiintyä siinä

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

määrin mittauseroja, ettei mittatulosten tulkintaa ilman korjauksia voida tehdä. Lisäksi vertailussa on otettava huomioon PTM-mittaustekniikoissa ja laskenta-algoritmeissa tapahtuva kehitys/muutos, mikä saattaa haitata ajallisesti kaukana toisistaan olevien mittausten vertailtavuutta. Ympyränkaaren sovituskäytännön käyttökelpoisuus kevytpäälysteisille teille tulisi testata kenttämittauksilla.

Uuden tien osalta pituussuuntaisen epätasaisuuden arviointi tulisi perustua maapohjan luokitteluun routivuuden (routanousennuste) ja kokoonpuristuvuuden (painaumaennuste) suhteen.

Mitoituskriteerit

Mitoituskriteereinä ovat suurimmat sallitut pituussuuntaiset epätasaisuudet (IRI-arvot pituusyksikköä kohti) mitoitusajana tielaitoksen ohjeiden mukaisesti. Lisäksi tielaitoksen ohjeissa esitetään sallitut pystykiiltyvyysarvoihin pohjautuvat yksittäistöyssyjen lukumäärät pituusyksikköä kohti. Mitoituskriteereitä käytetään varsinaisessa mitoituksessa raja-arvoina, jotka eivät saa ylittyä mitoitusajana.

Mitoittaminen

Lähtötietojen hankinta

Parantamishankkeilla lähtötietoina tarvitaan tien pituussuuntainen epätasaisuus ja sen kehittyminen ennen parantamista sekä olemassa oleva tierakenne, ilmastotiedot ja routanousut tai ainakin arvio niiden suuruudesta sekä raskaan liikenteen määrä. Pituussuuntaisen epätasaisuuden ja varsinkin sen lisääntymisnopeuden perusteella voidaan päätellä, missä kohdin tarvitaan parantamistoimenpiteitä, jotta mitoitusajana pituussuuntainen epätasaisuus ei ylittäisi sallittuja arvoja. Tällöin on otettava huomioon, että yleensä kevytpäälysteisten teiden parantamishankkeilla kulutuskerros uusitaan. PAB-O/V-päälysteisillä teillä vanha kulutuskerros joko jyrksitään pois tai sekoitetaan jyrsimällä sitomattomaan kantavaan kerrokseen. Tämän jälkeen pinta tasataan ja tehdään minimi toimenpiteenä uusi kulutuskerros. PAB-B ja AB-päälysteisillä teillä vastaavasti vanha kulutuskerros vähintäänkin tasataan päällysteteknisin keinoin uuden kulutuskerroksen tekemisen yhteydessä. Näillä menettelyillä olemassa olevat pienipiirteiset epätasaisuudet poistuvat.

Vanha tierakenne tulisi tuntee kohdissa, missä pituussuuntainen epätasaisuus on suurta ja/tai epätasaisuus lisääntyy nopeasti, samalla tapaa kuin pituushalkeamakohtissa. Näissä kohdissa tulisi tuntee lisäksi routanousut tai ainakin arvio niiden suuruudesta.

Uuden tien osalta pituussuuntaisen epätasaisuuden arviointi tehdään hankesuunnitteluvaiheessa soveltaen TPPT:ssä kuvattua periaatetta. Tien keskikiljan laskennallista routanousua verrataan ko. tielle ja tierakenteelle sal-

littavaan routanousuun. Tavanomaiset rakennekerrokset omaavilla AB-päällysteisillä teillä roudasta johtuvan pituussuuntaisen epätasaisuuden oletetaan palautuvan. Kausittainen epätasaisuus arvioidaan absoluuttisen, lasketun routanousun ja laskettujen routanousujen pituussuuntaisen vaihtelun perusteella. Sen sijaan PAB-teillä roudasta johtuvan pituussuuntaisen epätasaisuuden oletetaan jäävän pysyväksi.

Rakennevaihtoehdot

Pituussuuntaisen epätasaisuuden suhteen parantamisvaihtoehdot ovat periaatteessa seuraavat:

- kerrosten lisääminen, massanvaihto, lämpöeriste (routanousujen pienentäminen)
- stabiloinnit, kerrosten lisääminen, vahvisteet (päällysrakenteen yläosan jäykkyyden lisääminen)
- alusrakenteen homogenisointi

Päällysrakenteen yläosan jäykkyyden lisääminen tulee kyseeseen lähinnä silloin, kun routanousut (routaepätasaisuudet) eivät ole erityisen suuria. Päällysrakenteen yläosan jäykkyyttä voidaan lisätä uudella kulutuskerroksella, stabiloinneilla ja vahvisteilla (teräsverkko). Myös sitomattoman kantavan kerroksen paksuntaminen hyvällä materiaalilla lisää päällysrakenteen yläosan jäykkyyttä. Alusrakenteen homogenisointi pienentää paikallisesti pituussuuntaista epätasaisuutta tehokkaasti, jos se on johtunut esim. maakivistä. Yleensäkin alusrakenteen homogenisointi tasaa ja jonkin verran pienentää routanousuja.

Parannettavan tien kantavan kerroksen materiaalin ollessa heikko (paljon hienoaainesta, alhainen leikkauslujuus, herkkä kosteudelle) pituussuuntainen epätasaisuus ja sen lisääntyminen saattaa johtua yksinomaan kantavasta kerroksesta. Tällöin parantamiskeinoina tulevat kyseeseen materiaalin korvaaminen tai stabiloinnit.

Painumista johtuvat ja raja-arvot ylittävät pituussuuntaiset epätasaisuudet poistetaan TPPT:ssä esitetyillä menetelmillä: pohjarakentamalla, keventämillä, massanvaihdoilla tai siirtymärakenteilla.

Varsinainen mitoittaminen

Mitoittaminen perustuu parannettavan tierakenteen pituussuuntaiseen epätasaisuuteen ja sen lisääntymisnopeuteen sekä rakennevaihtoehdon laskennallisiin routanousuihin, joita verrataan vauriomalleihin ja mitoituskriteereihin.

Routamitoituksen (routanousujen) osalta menetellään samalla tapaa kuin pituushalkeamien tapauksessa. Muilta osin mitoitusmenettely on puhtaasti empiiristä eli käytetään hyväksi kenttäaineistoista johdettuja routanousujen ja pituussuuntaisen epätasaisuuden välisiä yhteyksiä (vauriomallit).

5.4 Poikkisuuntainen epätasaisuus

Vauriomekanismit

Perussyynä tien poikkisuuntaisen epätasaisuuden lisääntymiseen on liikennekuormitus ja sulamispehmeneminen. Toissijaisena syynä ovat routanousut ja varsinkin niiden epätasaisuus, mitkä aiheuttavat ns. dynaamisen kuormituslisän. Kolmantena syynä on pohjamaan hitaasti tapahtuva viruminen. Poikkisuuntainen epätasaisuus ilmenee ajolinjojen kohdalle syntyvänä urautumisena. Liikenteen kuormittaessa tierakennetta materiaali pyrkii siirtymään ajourien kohdalla alaspäin samalla syrjäyttäen vieressä olevaa materiaalia. Syrjäytyvä materiaali liikkuu sivulle ja ylöspäin pienintä vastusta kohden. Tienreunan puoleinen osa materiaalista liikkuu pääasiassa sivulle luiskan suuntaan ja ajourien välissä ylöspäin.

Vaakasuuntaisten pysyvien muodonmuutosten seurauksena tie ja siinä olevat halkeamat levenevät. Urautuminen on puolestaan seurausta ajourien kohdalla tapahtuvasta painumisesta sekä ajourien välissä tapahtuvasta materiaalin kohoamisesta. Tien levenemisen ja urautumisen välillä on selvä yhteys. Molemmat vaurioitumismekanismit liittyvät tierakenteen pysyviin muodonmuutoksiin. Mitä helpommin materiaali siirtyy vaakasuunnassa sitä nopeampaa on tien urautuminen.

Vauriomallit

Poikkisuuntaisen epätasaisuuden vauriomalleilla kuvataan epätasaisuuden kehittymistä ajan suhteen. Epätasaisuusmalleja käytetään alustavien rakennevaihtoehtojen kestoiän arviointiin mitoitusvaiheessa. Jos kestoikä muodostuu liian lyhyeksi, vaihtoehto hylätään.

Ajourien välisen harjanteen korkeus on kapeilla teillä selvästi parempi poikkisuuntaisen epätasaisuuden tunnusluku kuin ulkouran syvyys. Erityisesti kapeilla teillä leveneminen ja harjanteen korkeuden kasvu eivät havaittavasti hidastu iän myötä vaan vaurioituminen jatkuu vuosittain säännöllisesti. Vaurioiden kasvunopeus riippuu tierakenteen ominaisuuksista ja olosuhteista. Alusrakenteen laatu vaikuttaa voimakkaasti poikkisuuntaisen epätasaisuuden muodostumiseen. Sitomaton kantava kerros saattaa olla kriittinen pysyvien muodonmuutosten kannalta varsinkin siinä vaiheessa, kun tierakenne on keväällä sulanut vasta osittain ja kantava kerros sisältää paljon vettä pidättävää hienoaainesta ja/tai kerroksen sisäinen kitkakulma on pieni.

Kestoikä tutkimuksen ja kenttämittausten 1999 koealueilla harjanteen korkeudella ja varsinkin sen lisääntymisellä ja pudotuspainolaitteella mitattujen taipumien tai niiden avulla määritettyjen tunnuslukujen ja takaisinlaskettujen moduulien välillä on selvää riippuvuutta. Tulokset tulee varmentaa myös Etelä- ja Keski-Suomen olosuhteissa.

Harjanteen korkeuden kasvu riippuu myös poikkileikkauksen geometriasta kuten tien leveydestä, luiskan kaltevuudesta ja sivuojan pohjan etäisyydestä tasausviivaan nähden. Pituussuuntainen epätasaisuus (routanousut) vaikuttaa myös poikkisuuntaisen epätasaisuuden kehittymiseen dynaamisen kuormituslisän kautta.

Vauriomalleihin tulisi sisällyttää tavalla tai toisella tien rakennetta, olosuhteita, geometriaa ja raskaan liikenteen määrää sekä aikaa kuvaavat tekijät. Tierakennetta kuvataan pudotuspainolaitteella kesällä kaistan keskeltä mitattujen taipumien tai niistä laskettujen tunnuslukujen avulla. Esim. taipumien D0 ja D2 (300 mm) erotus kuvaa päällysrakenteen yläosan ja D5 (1200 mm) -taipuma alusrakenteen olosuhteita. D5 kuvannee jollakin tarkkuudella myös routanousujen suuruutta. Geometrian osalta ainakin tien leveys ja luiskan kaltevuus tulisi olla mukana vauriomalleissa.

Vauriomallien tulee pohjautua kenttäaineistoihin. Jos routanousujen ja kesällä määritetyn D5-taipuman välillä ei ole riittävää yhteyttä, joudutaan kenttäaineistoja täydentämään routanousujen osalta. Luiskan kaltevuuden merkityksestä harjanteen muodostumiseen saadaan tietoa myös suunniteltujen HVS-kokeiden avulla. Poikkisuuntaisen epätasaisuuden analyyttinen tarkastelu tulee lähinnä kysymykseen tilanteissa, joita kenttäaineisto ei kata tai kenttäaineiston hajonta osoittautuu liian suureksi.

Mitoituskriteerit

Mitoituskriteereinä ovat suurimmat sallitut ajourien väliset harjanteen korkeudet mitoitusaikana. Tielaitos ei ole tällä hetkellä määrittänyt sallittuja harjanteen korkeuksia. Käytännössä kevytpäälysteisillä teillä harjanteen korkeus on yhtä suuri tai suurempi kuin ulkouran syvyys. Harjanteen korkeuden mitoituskriteerien lähtökohtana voitaneen kuitenkin pitää tämän hetkisiä suurimpia sallittuja ulkouran syvyyksiä.

Mitoittaminen

Lähtötietojen hankinta

Parantamishankkeilla lähtötietoina tarvitaan tien poikkisuuntainen epätasaisuus (ajourien välinen harjanne) ja sen kehittyminen ennen parantamista sekä olemassa oleva tierakenne sekä sillä tehdyt pudotuspainomittaukset. Lisäksi tarvitaan ilmastotiedot ja routanousut tai ainakin arvio niiden suuruudesta sekä raskaan liikenteen määrä. Poikkisuuntaisen epätasaisuuden ja

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

varsinkin sen lisääntymisnopeuden perusteella voidaan päätellä, missä kohdin tarvitaan parantamistoimenpiteitä, jotta mitoitusaikana poikkisuuntainen epätasaisuus ei ylittäisi sallittuja arvoja. Tällöin on otettava huomioon, että yleensä kevytpäällysteisten teiden parantamishankkeilla olemassa olevat tien pinnan pienipiirteiset epätasaisuudet poistetaan.

Vanha tierakenne tulisi tuntea erityisesti kohdissa, missä poikkisuuntainen epätasaisuus on suurta ja/tai epätasaisuus lisääntyy nopeasti. Näissä kohdissa tulisi tuntea lisäksi routanousut tai ainakin arvio niiden suuruudesta. Pudotuspainomittauksia tehdään yleensä koko parantamishankkeelta.

Pudotuspainomittausten ajankohdaksi tulee valita kesä sen vuoksi, että kevytpäällysteisillä teillä kesällä olosuhteiden vaikutukset mittaustuloksiin ovat vähäisiä ja mittauksia voidaan tehdä pitkän ajanjakson aikana.

Pudotuspainomittaukset tulee tehdä kaistan keskeltä. Tällöin pienillä mittauskohtien vaihteluilla tien poikkisuunnassa ei ole suurtakaan merkitystä. Mittauksia ei kannata suorittaa ulkourassa. Lähellä tien reunaa pienilläkin mittauskohtien vaihteluilla tien poikkisuunnassa on suuri merkitys tuloksiin johtuen lähinnä tien reunan vaikutuksista. Lisäksi ulkouran ja mahdollisesti myös tien kapeus vaikeuttavat merkittävästi pudotuspainomittausten käytännön toteuttamista.

Rakennevaihtoehdot

Poikkisuuntaisen epätasaisuuden suhteen varsinaiset parantamistoimenpiteet ovat seuraavat:

- kerrosten lisääminen, stabiloinnit, vahvisteet (kuormituskestävyyden lisääminen)
- tien leventäminen, luiskan loiventaminen (reunatuen lisääminen)
- kerrosten lisääminen, massanvaihto, lämpöeriste (routanousujen pienentäminen)
- kuivatuksen tehostaminen (toimivuuden varmistaminen)

Päällysrakenteen kuormituskestävyyttä voidaan kasvattaa päällysrakenteen yläosan jäykkyyttä lisäämällä. Lähinnä tulevat kyseeseen hyvälaatuisen kantavan kerroksen materiaalin lisääminen ja erilaiset stabiloinnit. Myös tien poikkileikkauksen muuttamisella voidaan lisätä päällysrakenteen kuormituskestävyyttä. Liikenteen dynaamista kuormituslisää voidaan puolestaan vähentää rajoittamalla routanousuja.

Varsinainen mitoittaminen

Poikkisuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen perustuu parannettavan tierakenteen harjanteen korkeuteen ja sen lisääntymisnopeuteen sekä raken-

nevaihtoehdon laskennallisiin vasteisiin ja/tai laskennalliseen harjanteen muodostumiseen. Näitä verrataan vauriomalleihin ja mitoituskriteereihin.

Vauriomallit pohjautuvat kaistan keskeltä pudotuspainolaitteella mitattujen taipumien (vasteiden) osalta kesäarvoihin ja harjanteen kehittymisen osalta kaikkina vuodenaikoina tapahtuneisiin pysyviin muodonmuutoksiin. Käytettäessä empiirisiä vuorosuhteita ei voida erottaa eri vuodenaikoina tapahtuvia pysyviä muodonmuutoksia ja mahdollisesti niihin vaikuttavia tekijöitä, mistä syystä periodijaon käyttö mitoituksessa on vähintäänkin kyseenalaista. Analyttisessä mitoituksessa periodijaon käyttö sitävastoin on tarkoituksenmukaista. Eri vuodenaikoina varsinkin alusrakenteen ominaisuudet saattavat vaihdella merkittävästi, mikä puolestaan vaikuttaa pysyvien muodonmuutosten kehittymiseen. Jos alusrakenteen osalta eri vuodenaikoina tapahtuvat pysyvät muodonmuutokset ovat verrannollisia D5 (1200 mm) -taipumaan, voidaan kesäolosuhteissa määritettyä D5-taipumaa käyttää kuvaamaan koko vuoden osalta alusrakenteen olosuhteita jollakin tarkkuudella. Jos harjanteen muodostuminen on erityisesti sulamisvaiheessa todennäköistä, pudotuspainomittauksia tulisi tehdä myös sulamisvaiheessa varsinkin silttisillä alusrakenteilla.

Parantamishankkeilla harjanteen korkeuden kasvun mitoittaminen pohjautuu pudotuspainolaitteella mitattuihin taipumiin ja takaisinlaskettuihin moduuleihin seuraavasti:

1. Pudotuspainolaitteella määritetyt taipumat kaistan keskellä kesällä
2. Takaisinlaskenta: kerrosten moduulit (parannettava tie)
3. Moduulien korjaaminen
 - 3.1 Olosuhteiden vaikutus moduuleihin (kosteus)
 - 3.2 Parantamisen vaikutus moduuleihin (muutokset jännitystilassa)
4. Mitoituksen pohjana olevat kerrosten moduulit
5. Vasteiden laskenta

Päälysteen ollessa ohut, kuten kevytpäälysteisillä teillä, kerrosten moduulien takaisinlaskenta on osittain ongelmallista. Käytännön syistä joudutaan päälysteen moduulille käyttämään kiinteää arvoa. Lisäksi pyörän aiheuttama kuormitusjakauma saattaa poiketa levyn aiheuttamasta kuormitusjakaumasta, jolloin saadaan esim. sitomattomalle kantavalle kerrokselle hie-
man liian suuria arvoja. Koska tarkastellaan kuitenkin suhteellisia arvoja, kuormitusjakaumalla ei välttämättä ole kovinkaan suurta merkitystä edellyttäen, että käytetään periaatteessa aina samaa takaisinlaskentamenettelyä ja samantyyppistä pudotuspainolaitetta.

Jos pudotuspainomittauksia edeltävä ajanjakso on pitkään ollut poikkeuksellisen kuiva, takaisinlaskettuja moduuleja tulisi pienentää jonkin verran. Muutoin saadaan liian hyvä kuva parannettavasta rakenteesta.

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

Jos parantamisessa lisätään tai poistetaan materiaalia, sitomattomien kerrosten ja osittain myös alusrakenteen jännitystila muuttuu. Jännitystila vaikuttaa sekä sitomattomien kerrosten että alusrakenteen moduuleihin, mistä syystä määritetyt vanhan tierakenteen moduulit tulee korjata vastaamaan parannetun tierakenteen jännitystilaa.

Parantamishankkeilla mitoitusmenettely riippuu parannettavan tien poikkigeometriasta ja parantamisen rankkuudesta. Jos tie on kohtuullisen leveä (≥ 6 m) ja parantamistoimenpiteeksi riittää uusi kulutuskerros tai kantavan kerroksen materiaalin lisäys sekä mahdolliset poikkileikkauksen geometrian muutokset, mitoitusmenettely pohjautuu parannettavan tierakenteen harjanteen kasvunopeuteen. Koska muutokset tierakenteessa, leveydessä tai luiskan kaltevuudessa vaikuttavat harjanteen muodostumiseen, niiden merkitys tulee ottaa huomioon harjanteen kasvunopeutta arvioitaessa seuraavasti:

1. *Muutokset tierakenteessa:* määritetään parannettavan tierakenteen ja rakennevaihtoehdon laskennallinen ero harjanteen muodostumisessa vauriomallien perusteella. Ero määritetään vauriomalleissa olevien vasteiden (esim. taipumien erotus) avulla. Parannettavan tierakenteen ja rakennevaihtoehdon vasteet määritetään monikerros-laskentamenettelyllä. Parannettavan tierakenteen osalta käytetään takaisinlaskettuja moduuleja, mitkä on korjattu tarvittaessa olosuhteilla (kosteuskorjaus erityisesti siltimaapohjilla). Rakennevaihtoehdon osalta käytetään puolestaan moduuleja, mitkä on korjattu jännitystilalla ja mahdollisesti olosuhteilla (ns. mitoituksen pohjana olevat kerrosten moduulit).
2. *Muutokset tien leveydessä ja luiskankaltevuudessa:* muutokset harjanteen kasvunopeudessa määritetään käyttäen hyväksi vauriomalleja, HVS-kokeiden tuloksia ja teoreettisia laskelmia. Todennäköisesti vauriomallit eivät sisällä kaikkia tien poikkigeometriaan liittyviä tekijöitä, mistä syystä korjauskertoimien määrittämisessä joudutaan myös tukeutumaan HVS-kokeiden tuloksiin ja teoreettisiin laskelmiin.

Jos vanha tie on hyvin kapea (< 6 m) ja poikkigeometriaa muutetaan (leventäminen, luiskan loiventaminen) tai jos parantaminen on muuta kuin uuden kulutuskerroksen tai kantavan kerroksen materiaalin lisäystä (+kulutuskerros), mitoitusmenettely on uuden tien kaltainen. Kun on kyse rankasta parantamisesta tai uudesta tiestä, rakennevaihtoehdon mitoituksen pohjana olevat kerrosten moduulit määritetään kuten paksuilla AB-päällysteisillä teillä ottaen huomioon ennenkaikkea jännitystila. Tämän jälkeen määritetään vauriomallien sisältämät vasteet ja poikkileikkausgeometrian merkitys samalla tapaa kuin kevyessä parantamisessa. Tällöin rakennevaihtoehdon kestoikä harjanteen kasvun suhteen määritetään suoraan vauriomallien perusteella.

Uuden sekä raskaasti parannettavan tien poikkisuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen suositellaan tehtäväksi myös analyyttisellä menettelyllä, mikä sisältää kerroskohtaisen pysyvien muodonmuutosten laskennan. Tien pin-

nan pysyvät muodonmuutokset (siirtymät) lasketaan superpositioperiaatetta hyväksikäyttäen. Lähtötietoina ovat raskaan liikenteen määrä jaoteltuna akselipainoluokkiin, tien geometria ja rakennekerrospaksuudet sekä rakennekerrosten kokonaismuodonmuutosten ja pysyvien muodonmuutosten suhteet. Kerrosten ominaisuuksissa (moduuli, lujuus) otetaan huomioon jännitystilariippuvuus. Lisäksi kerrosten omaisuudet riippuvat häiriintymisherkyydestä ja kosteudesta. Jännitystila lasketaan kimmoteoriaa soveltaen rakenteen todellisella geometrialla (luiskan läheisyys ja kaltevuus).

Analyttinen menettely on välttämätön mitoitettaessa uusia rakenteita, joiden osalta empiiristä aineistoa ei ole kentältä saatavissa. Menettelyllä voitaneen myös testata eri rakennevaihtoehtojen teknistä toimivuutta pysyvien muodonmuutosten kannalta. Yksinkertaistettu urautumismalli, joka soveltuu leveillä pientareilla varustetuille teille, on esitetty TPPT:n suunnittelujärjestelmässä.

Sitomattoman kantavan kerroksen laatu tulisi ottaa huomioon myös mitoituksessa, koska joissakin tapauksissa se saattaa muodostua kriittiseksi pysyvien muodonmuutosten kannalta. Asettamalla sitomattomalle kantavalle kerrokselle tiukat laatuvaatimukset voidaan tällainen tilanne välttää edellyttäen, että myös kuivatus on kunnossa.

5.5 Eri vauriotyyppien yhteisvaikutukset

Erityyppiset vauriot vaikuttavat myös toisentyyppisten vaurioiden syntymiseen. Esimerkiksi pituushalkeamat heikentävät tierakenteen kuormituskestävyyttä halkeaman läheisyydessä. Itse halkeama muodostaa tiehen epäjatkuuskohdan ja lisäksi halkeamaan pääsee helposti vettä. Tällöin olosuhteet sekä pituus- että varsinkin poikkisuuntainen epätasaisuuden kasvulle ovat otolliset riippuen halkeaman sijainnista ja vaikeusasteesta. Toisaalta, jos routanousut ovat aiheuttaneet pituussuuntaista epätasaisuutta, poikkisuuntainen epätasaisuus lisääntyy nopeasti dynaamisen kuormituslisän vaikutuksesta. Yleensä silloin, kun routanousut ovat suuria, esiintyy myös sekä pituushalkeamia että suuria pituus- ja poikkisuuntaisia epätasaisuuksia.

Käytännössä eri vauriotyypit esiintyvät joko yksitellen tai yhdessä muiden vaurioiden kanssa. Lisäksi on lähes vaurioitumattomia tien kohtia. Mitoittamisen lähtökohtana tulee olla kunkin vauriotyyppin vauriomekanismit.

Kaikki vauriotyypit tulevat huomioon otetuksi suorittamalla mitoittaminen (rakennevaihtoehdon valinta) tietyssä käsittelyjärjestyksessä. Ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan routan aiheuttamia halkeamia ja valitaan sellaiset rakennevaihtoehdot, mitkä estävät mitoitusolosuhteissa pituushalkeamien syntymisen tietyllä todennäköisyydellä. Käytännössä rakennevaihtoehdot lukuunottamatta lujiteratkaisuja rajoittavat routanousut tietyn suuruisiksi. Parantamishankkeilla keskitytään jo halkeamia sisältävien kohtien lisäksi potentiaalisin halkeamakohtiin.

Toisessa vaiheessa tarkastellaan pituussuuntaista epätasaisuutta ja valitaan sellaiset rakennevaihtoehdot, mitkä rajoittavat pituussuuntaisen epätasaisuuden sallitulle tasolle mitoitusajana. Parantamishankkeilla keskitytään kohtiin, missä pituussuuntainen epätasaisuus on suurta ja/tai se lisääntyy nopeasti. Toisessa vaiheessa tulevat erikseen käsiteltäviksi kohdat, missä on vain pituussuuntaista epätasaisuutta ja kohdat, missä on myös roudan aiheuttamia halkeamia. Tässä vaiheessa tarkistetaan, että ensimmäisen vaiheen rakennevaihtoehdot täyttävät myös pituussuuntaisen epätasaisuuden vaatimukset.

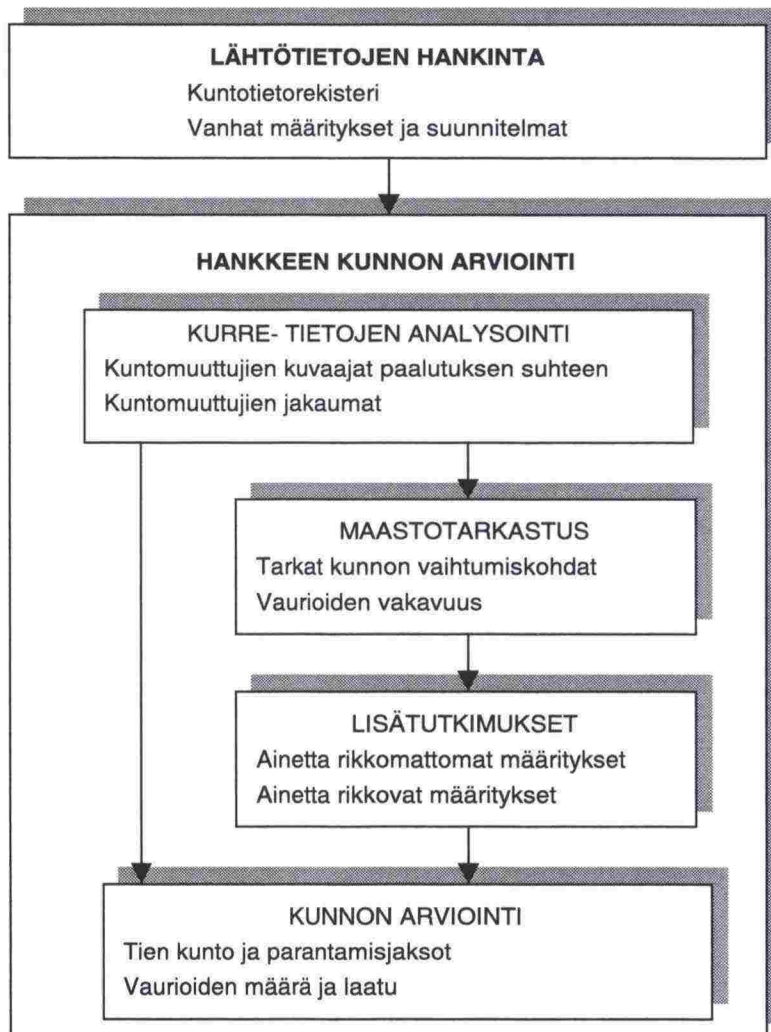
Kolmannessa vaiheessa tarkastellaan poikkisuuntaista epätasaisuutta ja valitaan sellaiset rakennevaihtoehdot, mitkä rajoittavat poikkisuuntaisen epätasaisuuden sallitulle tasolle mitoitusajana. Parantamishankkeilla keskitytään kohtiin, missä poikkisuuntainen epätasaisuus on suurta ja/tai se lisääntyy nopeasti. Kolmannessa vaiheessa tulevat erikseen käsiteltäviksi kohdat, missä on vain poikkisuuntaista epätasaisuutta ja kohdat, missä on myös pituussuuntaista epätasaisuutta ja/tai roudan aiheuttamia halkeamia. Tässä vaiheessa tarkistetaan, että edellisten vaiheiden rakennevaihtoehdot täyttävät myös poikkisuuntaisen epätasaisuuden vaatimukset.

5.6 Käytännön näkökohtia

Parantamisvaihtoehtoja valittaessa on otettava huomioon mahdolliset liikenneteknisistä syistä johtuvat vaatimukset kuten tien leveys. Lopullisten rakennevaihtoehtojen valintaan vaikuttavat käytännössä myös rakennevaihtoehtojen lukumäärä, järkevän pituiset parantamisjaksot, eräissä tapauksissa myös massamäärät (esim. stabiloinnit) ja materiaalien saatavuus yms.

Usein rahoituksen niukkuus aiheuttaa sen, ettei suunnittelumenetelmän mitoituskriteerien edellyttämiä rakenteita voida toteuttaa. Käytännössä joudutaan joko lyhentämään mitoitusajaa tai lieventämään mitoituskriteerien raja-arvoja. Mitoitusajan tulee olla joka tapauksessa kohtuullisen pitkä eli kestojen riittävä. Mitoituskriteerien muuttamisessa on kuitenkin huolehdittava siitä, että eri vauriotyyppeihin liittyvät kriteerit ovat sopusoinnussa keskenään. Tarvittaessa kullakin hankkeella voidaan käyttää omia kriteeriarvoja. Raja-arvot ovat joka tapauksessa välttämättömiä, jotta eri tyyppiset vauriot saadaan haittavaikutuksiltaan yhteismitallisiksi.

Parantamishankkeilla kannattaisi kustannus- ja tehokkuussyistä tehdä ns. vaurioanalyysi, millä tarkoitetaan vaiheittain etenevää parannettavan tierakenteen kunnon arviointia (kuva 28). Vaurioanalyysissä hyödynnetään jo olemassa olevaa tietoa ja pyritään optimoimaan tarvittavat lisämittaukset. Esimerkiksi routanousuja kannattaa käytännössä mitata routahalkeamia sisältävien kohtien lisäksi lähinnä vain potentiaalisissa routahalkeamakohdissa. Kohdat, missä ovat suuret pituus- tai poikkisuuntaiset epätasaisuudet ja/tai niiden kehittyminen on nopeaa, ovat mitä ilmeisimmin myös potentiaalisia routahalkeamakohtia.



Kuva 28. Parannettavan tierakenteen kunnan arviointi (Hanketason vaurioanalyysi). [Lämsä, 1998]

Alkuvaiheessa vauriomallit ovat mitä ilmeisimmin varsin alustavia, koska ne perustuvat rajalliseen kenttäaineistoon. Myöhemmin vauriomalleja joudutaan verifioimaan sen myötä, kun saadaan kerättyä lisää kenttäaineistoa. Myös mitoituskriteerit saattavat alkuvaiheessa olla alustavia, joita joudutaan myöhemmin tarkistamaan.

6 YHTEENVETO

Kevytpäällysteisten teiden käyttäytymistä käsittelevän *Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusmenetelmien kehittäminen*-projektin perusteosassa on tarkasteltu pääasiassa kevytpäällysteisen tierakenteen vaurioitumisprosessia sekä selvitetty mitkä ovat tärkeimmät rakenteellisen kunnan kehittymiseen vaikuttavat vauriomekanismit. Vaurioitumisprosessien ja -mekanismien perusteella on arvioitu rakenteen mitoitusyhypoteesit mitoitusmenettelyn kehittämiseksi. Lisäksi perusteosassa on tarkasteltu Tielaitoksen tällä hetkellä käyttämien tienpidon ohjaus- ja ylläpitojärjestelmien (HIPS, PMS) toiminnallisuutta kevytpäällysteisten teiden osalta sekä arvioitu mitoitusmenettelyn kehittämistarpeita Tielaitoksen näkökulmasta. Perusteosan tuloksia on tarkoitus hyödyntää laadittaessa kevytpäällysteisille teille soveltuvia mitoitusmenetelmiä ja kestoikämallia.

Perusteosan pohjana ovat olleet tähän mennessä projektin yhteydessä tehty kirjallisuusselvitykset, kenttätutkimukset, laskennalliset tarkastelut sekä muissa yhteyksissä tehty tutkimukset. Tarkoituksena on ollut selvittää erityisesti kevytpäällysteisten teiden kuormituskäyttäytymistä ja vaurioitumisprosessia. Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumisen kannalta kriittisimpiä, ja sen vuoksi mitoitusmenettelyn kehittämisen lähtökohdaksi otettavia, tekijöitä ovat roudan aiheuttamat halkeamat sekä tien pituus- ja poikkisuuntainen epätasaisuus.

Roudan aiheuttamat halkeamat ovat pääosin pituussuuntaisia halkeamia. Alusrakenteen vaihdellessa osa roudan aiheuttamista halkeamista saattaa olla myös vinoja tai poikkittaisia. Pituushalkeamat johtuvat epätasaisista routanousuista tien poikkisuunnassa, jolloin päällysrakenteen yläosaan syntyy vetojännityksiä ja -muodonmuutoksia. Rasitukset riippuvat siitä, kuinka suuria kulmanmuutoksia routanousu synnyttää tien pintaan. Noin 7 m leveällä tiellä pituushalkeama muodostuu tyypillisesti tien keskiosalle. Kapeammilla teillä pituussuuntaiset routahalkeamat syntyvät yleensä tien reunoille. Kevytpäällysteisillä teillä rakenteen toiminnan kannalta pituushalkeamat ovat yleensä kaikkein merkittävin halkeamatyyppi, minkä vuoksi se tulee sisällyttää kevytpäällysteisten teiden mitoitusmenettelyyn.

Parantamishankkeilla roudan aiheuttamien pituushalkeamien mitoittamisessa lähtötietojen hankinnan tulee sisältää pituushalkeamien ja niiden vaikeusasteen inventoinnin, routimattomien kerrosten ja tien leveyden määrittämisen, routanousuerojen ja/tai routanousujen mittaamisen sekä ilmastotietojen selvittämisen. Parantamisen tarpeellisuus selvitetään inventoitujen pituushalkeamien ja niiden vaikeusasteen perusteella. Rakennevaihtoehtojen valinta perustuu joko routanousujen vähentämiseen tai päällysrakenteen yläosan lujittamiseen. Roudan aiheuttamien pituushalkeamien mitoittamisessa tarkastellaan laskennallisten routanousujen ja tien leveyden mukaista pituushalkeamariskiä.

Pituussuuntainen epätasaisuus johtuu kevytpäällysteisillä teillä pääasiassa routanousujen epätasaisuudesta ja/tai alusrakenteen painumisesta. Toissijaisena syynä on liikennekuormitus. Ainakin PAB-O teillä IRI-arvot ovat keväällä ja kesällä suuruudeltaan hyvin lähellä toisiaan. Epätasaisuuden aiheuttaneet tekijät ovat kuitenkin erilaiset: keväällä routanousut ja niiden epätasaisuus, kesällä pysyvät muodonmuutokset. Keväällä tierakenteen alkaessa sulaa routaepätasaisuudet aiheuttavat tiehen dynaamisia kuormituslisiä, jolloin sulavaan päällysrakenteeseen syntyy helposti pysyviä muodonmuutoksia. Sulamisen edistyessä myös alusrakenteeseen alkaa muodostua pysyviä muodonmuutoksia. Suuri osa kesällä esiintyvistä pituussuuntaisista epätasaisuuksista johtuu alusrakenteen epätasaisesta deformatumisesta. Pituussuuntainen epätasaisuus on tien palvelutason kannalta merkittävin tekijä, mistä syystä sen sisällyttäminen kevytpäällysteisten teiden mitoitusmenetelyyn on välttämätöntä.

Pituussuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen riippuu siitä, aiheutuuko pituussuuntainen epätasaisuus pääasiassa routimisesta vai alusrakenteen painumisesta. Painumisesta johtuvan pituussuuntaisen epätasaisuuden mitoittamisessa voidaan soveltaa paksuille AB-päällysteille kehitettyjä (TPPT) menetelmiä. Parantamishankkeilla routimisesta johtuvan pituussuuntaisen epätasaisuuden mitoittamisessa lähtötiedoiksi tarvitaan pituussuuntainen epätasaisuus ja sen kehittyminen ajan suhteen, rakennetiedot, routanousut ja ilmastotiedot sekä raskaan liikenteen määrä.

Parantamisen tarpeellisuus selvitetään pituussuuntaisen epätasaisuuden ja sen kehittymisnopeuden perusteella. Rakennevaihtoehtojen valinnassa perusteena ovat routanousujen pienentäminen, päällysrakenteen yläosan jäykkyyden lisääminen ja/tai alusrakenteen homogenisointi. Routimisesta johtuvan pituussuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen perustuu parannettavan tien pituussuuntaiseen epätasaisuuteen ja rakennevaihtoehdolle vauriomalleilla arvioituun pituussuuntaisen epätasaisuuden kehittymiseen.

Tien poikkisuuntaisen epätasaisuuden lisääntymisen perussyynä on liikennekuormitus. Toissijaisena syynä ovat routanousut ja varsinkin niiden epätasaisuus (dyn. kuormituslisä). Kolmantena syynä on pohjamaan hitaasti tapahtuva viruminen. Poikkisuuntainen epätasaisuus ilmenee ajolinjojen kohdalle syntyvänä urautumisena. Liikenteen kuormittaessa rakennetta materiaali pyrkii siirtymään ajourien kohdalla alaspäin samalla syrjäyttäen vieressä olevaa materiaalia, jolloin tienreunan puoleinen osa materiaalista liikkuu pääasiassa sivulle (tie levenee) luiskan suuntaan ja ajourien välissä ylöspäin. Urautuminen on seurausta materiaalin kohoamisesta ajourien välissä ja painumisesta ajourien kohdalla. Tien leveneminen ja urautuminen liittyvät tierakenteen pysyviin muodonmuutoksiin. Mitä helpommin materiaali siirtyy vaakasuunnassa sitä nopeampaa on tien urautuminen.

Poikkisuuntaista epätasaisuutta kuvataan ajourien välisellä harjanteen korkeudella. Poikkisuuntainen epätasaisuus on myös yksi merkittävästi tien palvelutasoon vaikuttava tekijä ja siksi se tulee sisällyttää mitoitusmenetelyyn. Kevytpäällysteisillä teillä osittain samat tekijät vaikuttavat sekä poikkisuun-

Virhe. Tyyliä ei ole määritetty.

taiseen epätasaisuuteen että verkkohalkeiluun, jolloin myös verkkohalkeamat tulevat välillisesti otetuksi huomioon mitoituksessa.

Parantamishankkeilla poikkisuuntaisen epätasaisuuden mitoittamisessa lähtötietoina tarvitaan harjanteen korkeus ja sen kehittyminen ajan suhteen, rakennetiedot, pudotuspainolaitemittaustulosten analyysit, raskaan liikenteen määrä, routanousut sekä ilmastotiedot.

Parantamisen tarpeellisuus selvitetään harjanteen korkeuden ja sen kehittymisnopeuden perusteella. Rakennevaihtoehtojen valinnassa ovat perusteena päällysrakenteen yläosan jäykkyyden lisääminen, reunatuen lisääminen, routanousujen pienentäminen ja/tai kuivatuksen tehostaminen. Varsinainen poikkisuuntaisen epätasaisuuden mitoittamistapa riippuu parantamistarpeen rankkuudesta. Kevyen parantamisen mitoittaminen perustuu parannettavan tien harjanteen kehittymiseen ja vauriomalleilla arvioituun harjanteen muodostumiseen tierakenteen vasteita apuna käyttäen. Raskaassa parantamisessa mitoittaminen perustuu vauriomallien mukaiseen harjanteen muodostumiseen ja teoreettisiin laskelmiin samalla tapaa kuin uudella tiellä.

Eri vauriotyypit vaikuttavat myös toisten vaurioiden syntymiseen. Vaurioita esiintyy tien kohdissa yksitellen tai yhdessä muiden vaurioiden kanssa. Lisäksi osa tien kohdista on lähes vaurioitumattomia. Vaurioiden päällekkäisyydestä huolimatta mitoittamismenettelyn lähtökohtana tulee kuitenkin olla kunkin vauriotyyppin oma vauriomekanismi. Siksi mitoittaminen (rakennevaihtoehdon valinta) suoritetaan kunkin vauriotyyppin osalta erikseen.

Ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan roudan aiheuttamia halkeamia ja valitaan sellaiset rakennevaihtoehdot, mitkä estävät mitoitusolosuhteissa pituushalkeamien syntymisen (halkeamariski) tietyllä todennäköisyydellä.

Toisessa vaiheessa tarkastellaan pituussuuntaista epätasaisuutta ja valitaan sellaiset rakennevaihtoehdot, mitkä rajoittavat pituussuuntaisen epätasaisuuden (IRI) sallitulle tasolle mitoitusaikana.

Kolmannessa vaiheessa tarkastellaan poikkisuuntaista epätasaisuutta ja valitaan sellaiset rakennevaihtoehdot, mitkä rajoittavat poikkisuuntaisen epätasaisuuden (harjanteen korkeus) sallitulle tasolle mitoitusaikana.

Uuden tien osalta lähtötietojen hankinnassa sovelletaan samoja periaatteita kuin paksuilla AB-päällysteisillä teillä (TPPT-projekti). Käytännössä kevytpäällysteisillä teillä lähtötietojen kattavuus ja laatu ovat rajoitetumpia kuin korkealaatuisempia teitä käsittelevässä TPPT-projektissa.

Pituushalkeamien mitoittamisessa tarvitaan laskennalliset routanousut, mikä edellyttää alusrakenteen routimiskertoimen SP arvioimista. SP:n määrittämisessä noudatetaan uusilla teillä samaa periaatetta kuin paksujen AB-teiden yhteydessä. Pituussuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen tapahtuu uu-

silla teillä suoraan vauriomallien avulla. Poikkisuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen puolestaan perustuu uusilla teillä (ja raskaalla parantamisella) arvioituun harjanteen muodostumiseen laskennallisia vasteita apuna käyttäen. Tällöin vasteiden määrittämisessä käytetään moduuleja, jotka on arvioitu samoja periaatteita noudattaen kuin paksuilla AB-teillä. Uuden sekä raskaasti parannettavan tien poikkisuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen suositellaan tehtäväksi myös analyyttisellä menettelyllä, mikä sisältää kerroskohtaisen pysyvien muodonmuutosten laskennan.

Mitoitusmenettelyn avulla saadaan selvitettyä rakenteen kestävyys- ja kantavuuden kannalta hyväksyttävät rakennevaihtoehdot. Lopullinen rakenteen valinta tulisi tehdä teknistaloudellisten vertailujen perusteella.

LÄHDELUETTELO

Addis, R.R. Collaborative Accelerated Pavement Testing in the European Context. 16th ARRB Conference. pp. 363-391 Perth, Wester Australia 1992.

Belt, J. Kestoikätutkimus, loppuraportti. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion tutkimusselostuksia 2/1999. Oulu 1999.

COST 333 Transport Research. Development of New Bituminous Pavement Design Method. European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research. Luxembourg 1999. ISBN 92-828-6796-X.

Craus, J., Yuce, R., Monismith, C.L., Fatigue Behaviour of Thin Asphalt Concrete Layers in Flexible Pavement Structures. The Asphalt Paving Technology 1984. Michigan, USA 1984.

Ehrola, E. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. Tampere 1996. ISBN 951-682-338-6

Kallio, V. Kantavan kerroksen laatututkimus. Tielaitos, tuotanto, konsultointi. 2000. (alustavia tuloksia tutkimuksesta 1.3.2000)

Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, R., Törnqvist, J. Kevytpäällysteiset tierakenteet, Tierakenteen plastinen käyttäytyminen, Kirjallisuustutkimus. VTT Yhdyskuntatekniikka. Espoo 1999. (työraportti 29.11.1999)

Koskela, P., Lämsä, VP., Belt, J. Kevytpäällysteisten teiden laskennallinen tarkastelu elementtimenetelmällä. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorio. Oulu 1999. (työraportti 3.12.1999)

Lehtonen, K. Tielaitoksen kuntorekisteristä saatavat vaurioitumismallit. Tielaitos, tie- ja liikennetekniikka. 2000. (alustavia tuloksia tutkimuksesta 7.3.2000)

Lekarp, F., Isacsson, U. Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials. Licentiate Thesis. Kungliga Tekniska Högskolan. TRITA-IP FR 97-20. 1997.

Liimatta, L. Kenlayer- tarkastelut. Oulun yliopisto, tie- ja liikennetekniikan laboratorio. Oulu 1999. (työraportti b, 20.12.1999)

Liimatta, L. Kevytpäällysterakenteen kuormituskäyttäytyminen kevätolosuhteissa. Oulun yliopisto, tie- ja liikennetekniikan laboratorio. Oulu 2000. (työraportti c, 13.3.2000)

Liimatta, L. Kirjallisuusselvitys. Oulun yliopisto, tie- ja liikennetekniikan laboratorio. Oulu 1999. (työraportti a, 20.12.1999)

Lämsä, VP. Hanketason vaurioanalyysi, loppuraportti. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorio. Oulu 1998.

Lämsä, VP. Vuoden 1999 kenttämittaukset kevytpäällysteisillä teillä. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorio. Oulu 1999. (työraportti 3.12.1999)

Molenaar, A.A.A. Pavement evaluation and overlay design using falling weight declectometer and other deflection measurement devices. Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation. Oulun yliopisto, tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja nro 36. ss. 401-474. Oulu 1995.

Päällystettyjen teiden ylläpidon toimintalinjat ja ohjaus. Tielaitos, tiehallinto, tie- ja liikenneolojen suunnittelu. Helsinki 1999. TIEL 1000019

Routavaurio- ja kuivatustutkimus, Pituushalkeamat osa I, Routanousun vaikutus halkeaman todennäköisyyteen. Tielaitos, Tiehallitus, Kehittämiskeskus. Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 1/1991. Helsinki 1991. TIEL 4000004.

Routavaurio- ja kuivatustutkimus, Pituushalkeamat osa II, Tien rakenne- ja olosuhdetekijöiden vaikutus tien routanousuihin. Tielaitos, Tiehallitus, Kehittämiskeskus. Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 2/1991. Helsinki 1991. TIEL 4000005.

Ruotoistenmäki, A., Järvinen, S. Taipumamittausten mittauskierron ja mittausvälin tilastollinen selvitys. Inframan Oy. Espoo 1999.

Ruotoistenmäki, A., Spoof, H. Tien rakenteellinen kunto. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 435. Espoo 1997.

Ruotoistenmäki, A., Spoof, H. Tien rakenteellinen kunto. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 480. Espoo 1999.

Spoof, H. Tien rakenteellinen kunto Tielaitoksen toiminnan suunnittelussa. VTT Yhdyskuntatekniikka. Espoo 2000. (työraportti 3.2.2000)

Ullidtz, P. Pavement Analysis. Developments in Civil Engineering, vol 19. Lyngby, Denmark 1987.

Virtala, P. Tieverkon ylläpidon ohjausjärjestelmä, HIPS. Tielaitos. Helsinki 1996.

LIITTEET

- Liite 1: PMSpro:n perusasetukset (luonnos 28.1.2000)
- Liite 2: Tierakenteen taipumat pudotuspainolaitteella, vuoden 1999 kenttämittaukset Pt 18717 pl 595.
- Liite 3: Kantavan kerroksen laatututkimuksen tuloksia.
- Liite 4: Kevytpäällysteisen tierakenteen parantamisen mitoitusmenettely (hypoteesit).

28.1.2000

Reijo Prokkola

PMSpro:n perusasetukset – luonnos

Tielaitos
Tiestötiedot
Helsinki 2000

SISÄLTÖ

1	VAIKUTTAVAT TOIMENPITEET	3
2	TYÖMÄÄRITTELYT	4
3	VAIKUTUKSET	4
3.1	Kantavuusmallin toimenpideluokat	4
3.2	Tasaisuusmallin toimenpideluokat	5
3.3	Uramallin toimenpideluokat	5
3.4	Vauriomallin toimenpideluokat	5
3.5	Vaikuttavien toimenpiteiden vaikutukset	6
4	VALINTAEHDOT	6
5	RAJA-ARVOT JA VAKIOT	8
5.1	Tunnuslukujen raja-arvot (kuntotavoiterajat)	8
5.2	Valintaehtojen raja-arvot	9
5.3	Yhdistelyparametrit	10
5.4	Mallien parametrit	11
5.5	Vakiot	11

1 VAIKUTTAVAT TOIMENPITEET

Taulukko 1. Vaikuttavien toimenpiteiden selitykset ja km-hinnat, kun päällysteen oletusleveys yksiajorataisella tiellä on 6,5 m ja kaistan oletusleveys kaksiajorataisella tiellä on 3,5 m.

AB-tyyppiset toimenpiteet		Hinta [mk/km]
1. HJYR	Urapaikkaus jyrsimällä ilman lisämateriaalia.	32 500
2. ABPIN1	Pintaus: REM, REM+, ART tai MPKJ.	97 500
3. ABPIN2	Pintaus vilkasliikenteisillä teillä: REM, REM+, ART tai MPKJ.	130 000
4. ABMP1	Uudelleen päällystys: MP, MPK, LTA, TASK tai LJYR.	117 000
5. ABMP2	Uudelleen päällystys vilkasliikenteisillä teillä: MP, MPK, LTA, TASK tai LJYR.	169 000
6. ABRP	Rakenteen parantaminen: MV, MS, ABK, ABS tai stabiloinnit.	240 500
PAB-tyyppiset toimenpiteet:		
7. PABMPO	Ohut päällystys: PAB-B tai PAB-V; MP, LTA, REMO tai KAR; massamenekki $< 100 \text{ kg/m}^2$.	52 000
8. PABMPP	Paksu päällystys: PABB, tai PAB-V; MP tai TAS; massamenekki $\geq 100 \text{ kg/m}^2$.	91 000
9. PABRP	Rakenteen parantaminen: MV, MS tai stabiloinnit	156 000
SOP-tyyppiset toimenpiteet:		
10. SOP2	SOP-tien korjaus toisella SOP-kerroksella: massamenekki 5 kg/m^2 .	45 500

2 TYÖMÄÄRITTELYT

Taulukko 2. Toimenpiteiden työmäärittelyt

Toimenpide	Raankuus	P/A	Päällyste	Rae-koko	Massa Menekki	Työmenetelmä	RC-%	Päällyke	Yksikköhinta
HJYR	2	P	AB	0	0 kg/m ²	HJYR		1	5 mk/m ²
ABPIN1	4	P	AB	12	15 kg/m ²	REM	80	1	15 mk/m ²
ABPIN2	3	P	SMA	16	60 kg/m ²	MPKJ		1	20 mk/m ²
ABMP1	6	P	AB	16	100 kg/m ²	MP		1	22 mk/m ²
ABMP2	5	P	SMA	18	100 kg/m ²	MP		1	26 mk/m ²
ABRP	1	P	AB	16	100 kg/m ²	LTA		1	22 mk/m ²
		A			15 cm	MS		1	40 mk/t
PABMPO	9	P	PAB-V	16	50 kg/m ²	REMO	50	2	8 mk/m ²
PABMPP	8	P	PAB-V	16	100 kg/m ²	MP		2	14 mk/m ²
PABRP	7	P	PAB-V	16	100 kg/m ²	LTA		2	14 mk/m ²
		A			10 cm	MS		2	40 mk/t
SOP2	10	P	SOP	12	23 kg/m ²	MP		3	7 mk/m ²

3 VAIKUTUKSET

3.1 Kantavuusmallin toimenpideluokat

1. Toimenpiteellä ei ole vaikutusta kantavuuteen
2. Kantavuus on hyvä. Kevätkantavuuden arvoksi tulee 420 ja kantavuusaste lasketaan tämän perusteella uudelleen. Ongelman poistava toimenpide.
3. Kevätkantavuus kasvaa 40 MN ja kantavuusaste lasketaan uudestaan muuttuneesta kevätkantavuudesta.
4. Kevätkantavuus kasvaa 20 MN ja kantavuusaste lasketaan uudestaan muuttuneesta kevätkantavuudesta.
5. Kevätkantavuus heikkenee 10 MN ja kantavuusaste lasketaan uudestaan muuttuneesta kevätkantavuudesta.

3.2 Tasaisuusmallin toimenpideluokat

1. Toimenpiteellä ei ole vaikutusta tasaisuuteen
2. Tasaisuus on hyvä. Tasaisuuslukemaksi tulee päällysteluokan oletusarvo. Ongelman poistava toimenpide.
3. Tasaisuuden IRI-luku alenee 1 yksiköllä (tasaisuus paranee, muttei alle päällysteluokan oletusarvon)
4. Tasaisuuden IRI-luku alenee 0,5 yksiköllä (tasaisuus paranee, muttei alle päällysteluokan oletusarvon)
5. Tasaisuuden IRI-luku kasvaa 0,5 yksiköllä (tasaisuus heikkenee)

3.3 Uramallin toimenpideluokat

1. Toimenpide ei vaikuta urasyvyyteen eikä urautumisnopeuteen
2. Uran poistava toimenpide, jonka jälkeen uraa on alkupainuman verran ja urautuminen noudattaa oletuskehitystä. Ongelman poistava toimenpide.
3. Uran poistava toimenpide, urautuminen hidastuu 20%. Ongelman poistava toimenpide.
4. Uran poistava toimenpide, urautuminen ei muutu. Ongelman poistava toimenpide.
5. Uran poistava toimenpide, urautuminen kiihtyy 20 %. Ongelman poistava toimenpide.

3.4 Vauriomallin toimenpideluokat

1. Toimenpide ei vaikuta vauriosummaan eikä vauriokehitykseen
2. Vauriot poistava toimenpide, vauriokehitys oletusarvojen perusteella. Ongelman poistava toimenpide.
3. Vauriot poistava toimenpide, vauriokehitys hidastuu 20%. Ongelman poistava toimenpide.
4. Vauriot poistava toimenpide, vauriokehitys ei muutu. Ongelman poistava toimenpide.
5. Toimenpide ei poista vaurioita, mutta vauriokehitys kiihtyy 10%.
6. Vaurioita vähentävä toimenpide, joka ei poista ongelmaa. Toimenpiteen jälkeen vaurioita ei ole, mutta toisena vuotena toimenpiteen jälkeen vaurioita on yhtä paljon kuin niitä olisi tullut ilman toimenpidettä. Toimenpiteen jälkeinen vuosi lasketaan lineaarisesti toimenpidevuoden ja toisen vuoden väliltä.

3.5 Vaikuttavien toimenpiteiden vaikutukset

Taulukko 3. Toimenpiteiden vaikutukset.

Rank-kuus	Toimenpide	Kantavuus	Tasaisuus	Ura	Vauriot
1	ABRP	2	2	2	2
2	HJYR	5	2	2	1
3	ABPIN2	1	2	3	2
4	ABPIN1	1	2	2	2
5	ABMP2	1	2	3	2
6	ABMP1	1	2	2	2
7	PABRP	2	2	2	2
8	PABMPP	3	2	2	2
9	PABMPO	1	2	2	2
10	SOP2	1	1	1	2

4 VALINTAEHDOT

Taulukko 4. Toimenpiteiden valintaehdot.

Rank-kuus	Toimenpide	Ehdon nro	Syy	Muuttuja	Arvo
2	HJYR	1	Ura	Paal_luokka Ura Paal_cm Tp_tyomen Vaur_verkko Vaur	= 1 > URARAJA > 10 <> HJYR < 10 < VAURIORAJA
4	ABPIN1	2	Ura	Paal_luokka Ura Paal_cm	= 1 > URARAJA > 10
3	ABPIN2	3	Ura	Paal_luokka Ura Paal_cm KVL	= 1 > URARAJA > 10 > 6000
6	ABMP1	4	Ura	Paal_luokka Ura	= 1 > URARAJA
		5	Vauriot	Paal_luokka Vaur	= 1 > VAURIORAJA
5	ABMP2	6	Ura	Paal_luokka Ura KVL	= 1 > URARAJA > 6000

Jatkuu seuraavalla sivulla

Jatkoa edelliseltä sivulta

Rank- kuus	Toimen- pide	Ehdon Nro	Syy	Muuttuja		Arvo
1	ABRP	7	Ura ja kantavuus	Paal_luokka Ura Kant	= > <	1 URARAJA KANTAVUUSRAJA
		8	Ura ja vauriokehitys	Paal_luokka Ura Vaur_kehitys	= > >	1 URARAJA 10
		9	Ura ja leveät halkeamat	Paal_luokka Ura Vaur_lev	= > >	1 URARAJA 20
		10	Vauriot ja kantavuus	Paal_luokka Vaur Kant	= > <	1 VAURIORAJA KANTAVUUSRAJA
		11	Vauriot ja vauriokehitys	Paal_luokka Vaur Vaur_kehitys	= > >	1 VAURIORAJA 10
		12	Vauriot ja leveät halkeamat	Paal_luokka Vaur Vaur_lev	= > >	1 VAURIORAJA 20
9	PABMPO	13	Ura	Paal_luokka Ura	= >	2 URARAJA
		14	Vauriot	Paal_luokka Vaur	= >	2 VAURIORAJA
8	PABMPP	15	Vauriot ja tasaisuus	Paal_luokka Tas Vaur	= > >	2 TASAISUUSRAJA VAURIORAJA
		16	Vauriot ja kantavuus (lievä kanta- vuuspuute)	Paal_luokka Vaur Kant	= > <	2 VAURIORAJA 85
7	PABRP	17	Vauriot ja kantavuus	Paal_luokka Vaur Kant	= > <	2 VAURIORAJA KANTAVUUSRAJA
		18	Vauriot ja vauriokehitys	Paal_luokka Vaur Vaur_kehitys	= > >	2 VAURIORAJA 15
		19	Vauriot ja leveät halkeamat	Paal_luokka Vaur Vaur_lev	= > >	2 VAURIORAJA 30
10	SOP2	20	Vauriot	Paal_luokka Vaur	= >	3 VAURIORAJA

5 RAJA-ARVOT JA VAKIOT

5.1 Tunnuslukujen raja-arvot (kuntotavoiterajat)

PMSpro - Tunnuslukujen raja-arvot

Kantavuus | Tasaisuus | Ura | Vaurio

Päällysteluokka

KVL alaraja	Kovat asf.	Pehmeät asf.	SOP
0	70	70	70

☒ Lineaariset ☐ Luokakohtaiset

Tulostavoiterajat Valintaehtojen raja-arvot

PMSpro - Tunnuslukujen raja-arvot

Kantavuus | Tasaisuus | Ura | Vaurio

Nopeusrajoitus

KVL alaraja	120 - 101	100 - 81	80 - 61	60 - 1
0	3,5	4,5	5,5	6,5
1500	2	2,7	3,5	4,5

☒ Lineaariset ☐ Luokakohtaiset

Tulostavoiterajat Valintaehtojen raja-arvot

PMSpro - Tunnuslukujen raja-arvot

Kantavuus | Tasaisuus | Ura | Vaurio

Nopeusrajoitus

KVL alaraja	120 - 101	100 - 81	80 - 61	60 - 1
0	9999	9999	9999	9999
349	9999	9999	9999	9999
350	13	14	16	18

☒ Lineaariset ☐ Luokakohtaiset

Tulostavoiterajat Valintaehtojen raja-arvot

PMSpro - Tunnuslukujen raja-arvot

Kantavuus Tasaisuus Ura Vaurio

Päällysteluokka

KVL alaraja	Kovat asf.	Pehmeät asf.	SOP
0	160	160	160
1500	60	60	60

☒ Lineaariset ☐ Luokakohtaiset

Iulostavoiterajat Valintaehtojen raja-arvot

5.2 Valintaehtojen raja-arvot

PMSpro - Valintaehtojen raja-arvot

Kantavuus Tasaisuus Ura Vaurio

Päällysteluokka

KVL alaraja	Kovat asf.	Pehmeät asf.	SOP
0	70	60	60
350	70	70	60
1500	80	70	70
6000	80	80	70

Perusasetukset

PMSpro - Valintaehtojen raja-arvot

Kantavuus Tasaisuus Ura Vaurio

Nopeusrajoitus

KVL alaraja	120 - 101	100 - 81	80 - 61	60 - 1
0	3,5	3,5	4,1	5,5
350	2,5	3,5	4,1	5,5
1500	2,5	2,5	3,5	4,1
6000	2,5	2,5	2,5	3,5

Perusasetukset

PMSpro - Valintaehtojen raja-arvot

Kantavuus Tasaisuus Ura Vaurio

Nopeusrajoitus

KVL alaraja	120 - 101	100 - 81	80 - 61	60 - 1
0	17	18	19	20
350	16	17	18	19
1500	15	16	17	18
6000	15	15	16	17

Perusasetukset

PMSpro - Valintaehtojen raja-arvot

Kantavuus Tasaisuus Ura Vaurio

Päällysteluokka

KVL alaraja	Kovat asf.	Pehmeät asf.	SOP
0	140	140	140
350	70	80	90
1500	50	60	70
6000	30	40	60

Perusasetukset

5.3 Yhdistelyparametrit

PMSpro - Yhdistelyparametrit

Perusehdot

Yhteenlaskettu maksimipituus <= Perusasetukset

Päällystesaanto

☒ Sama päällysteluokka

☐ Sama päällystetyyppi

Yhdistelysäännöt

1. Sama toimenpide ja toimenpiteen suositusvuosi

2. Sama toimenpide ja suositusvuosien ero <

ja yhteispituus <

3. Keskimmäisen jakson pituus <

4. Kohde-ehdokkaan pituus <

5.4 Mallien parametrit

PMSpro - Mallit

Tasaisuus Ura Vauriot

Päällysteluokka	Oletus	Vakio	Kerroin
Kovat asf.	1,3	0,016	1,0524
Pehmeät asf.	1,6	0,036	1,056
SOP	1,6	0,036	1,056

Perusasetukset

PMSpro - Mallit

Tasaisuus Ura Vauriot

Alkupainuma (mm)

Maksimikehityksen vakio

Oletuskehityksen kerroin

Oletuskehityksen vakio

Perusasetukset

PMSpro - Mallit

Tasaisuus Ura Vauriot

Päällysteluokka	Oletus	Max
Kovat asf.	2	8
Pehmeät asf.	2	31
SOP	6	40

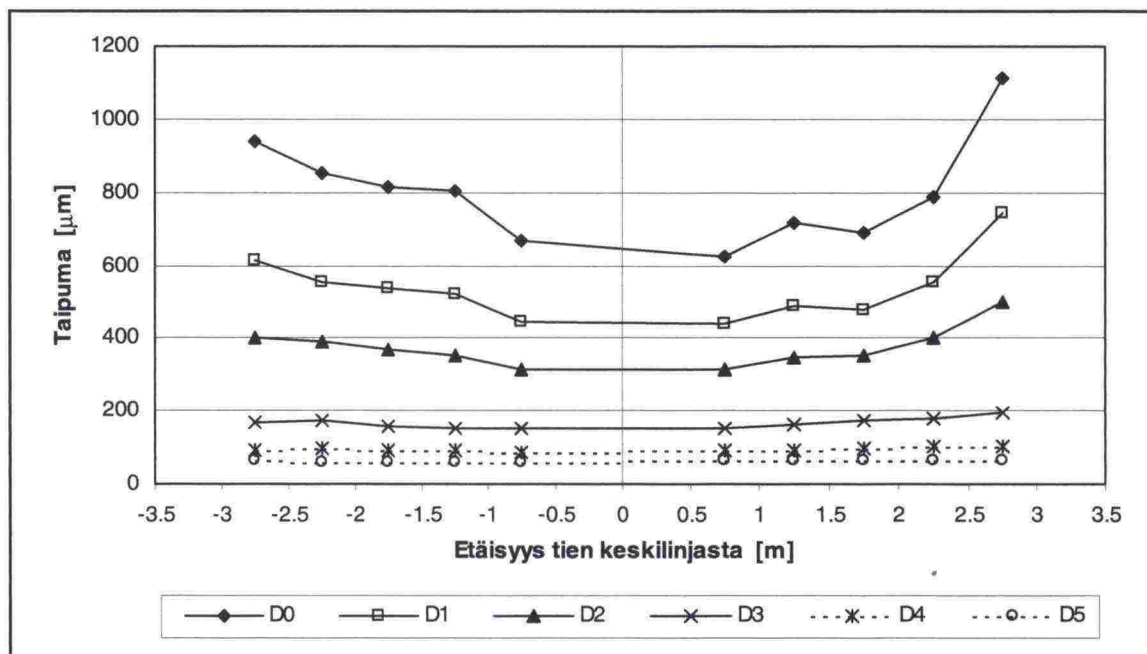
Perusasetukset

5.5 Vakiot

PMSpro - Vakiot

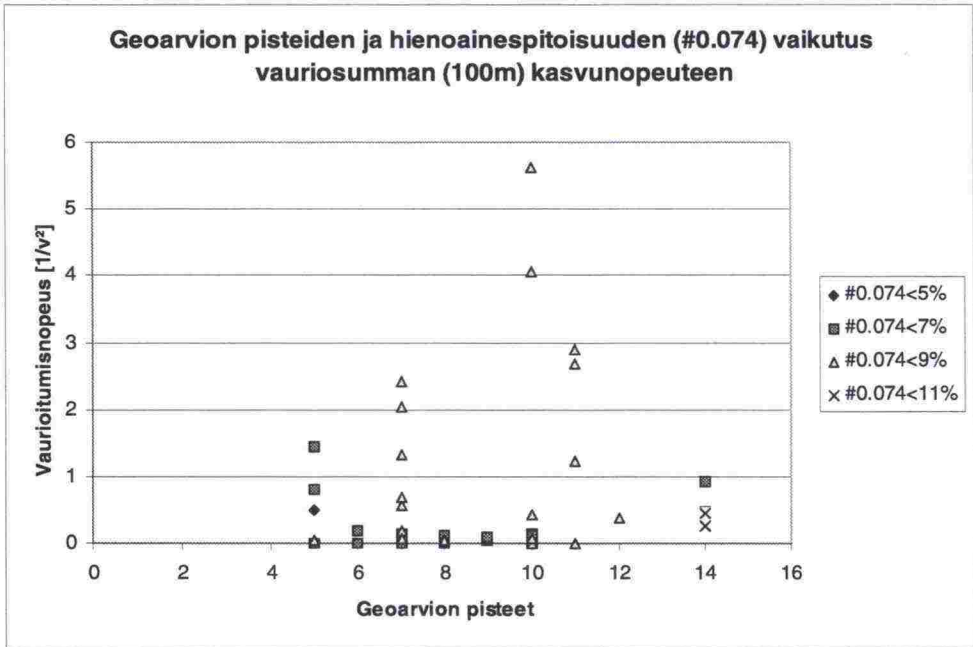
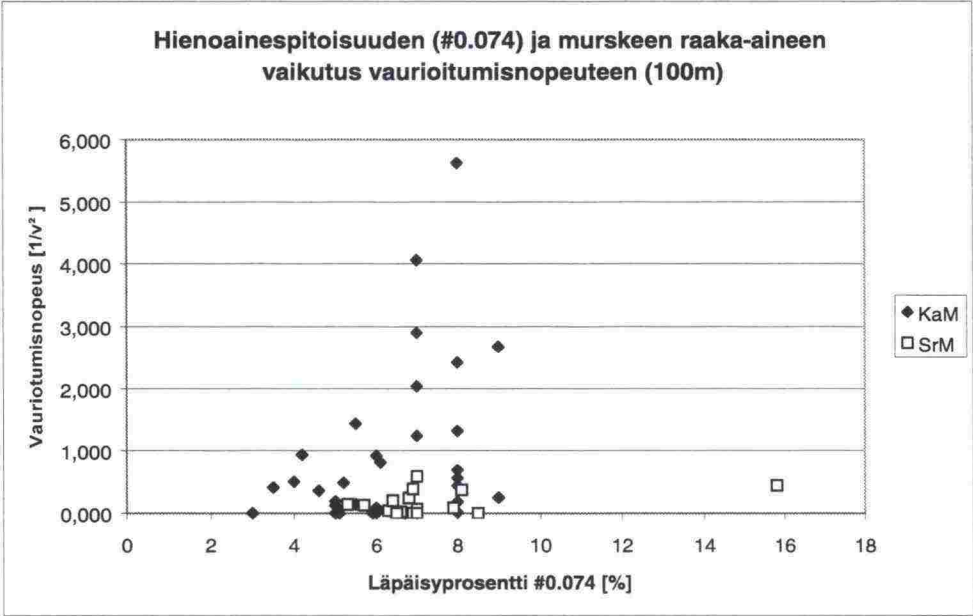
Vakio	Arvo	Kuvaus
KVL_VILKAS	6000	KVL-raja kovan kiven käytölle asf

TIERAKENTEEN TAIPUMAT PUDOTUSPAINOLAITTEELLA, VUODEN 1999 KENTTÄMITTAUKSET Pt 18717 pl 595.



taipuma	D0 = D(0 mm)
"	D1 = D(200 mm)
"	D2 = D(300 mm)
"	D3 = D(600 mm)
"	D4 = D(900 mm)
"	D5 = D(1200 mm)

KANTAVAN KERROKSEN LAATUTUTKIMUKSEN TULOKSIA

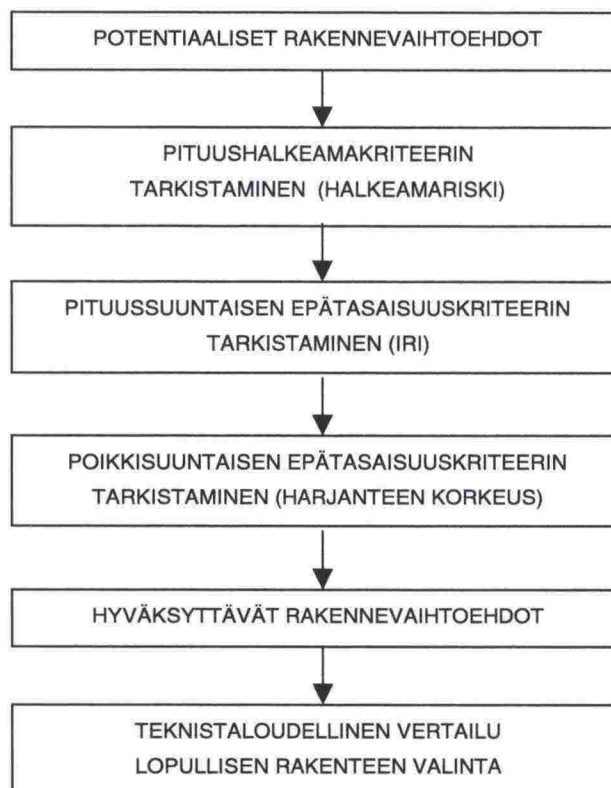


KEVYTPÄÄLLYSTEISEN TIERAKENTEEN PARANTAMISEN MITOITUSMENETTELY (HYPOTEESIT)

Mitoitusmenettelyssä tarkastellaan seuraavia vauriotyyppejä ja niiden yhteisvaikutuksia:

- roudan aiheuttamat pituushalkeamat
- pituussuuntainen epätasaisuus
- poikkisuuntainen epätasaisuus

Eri vauriotyyppien yhteisvaikutukset otetaan mitoitusmenettelyssä välillisesti huomioon suorittamalla mitoittaminen kuvan 1 mukaisessa käsittelyjärjestyksessä. Lopullinen rakenteen valinta perustuu teknistaloudellisiin vertailuihin, joita ei käsitellä tämän projektin puitteissa.

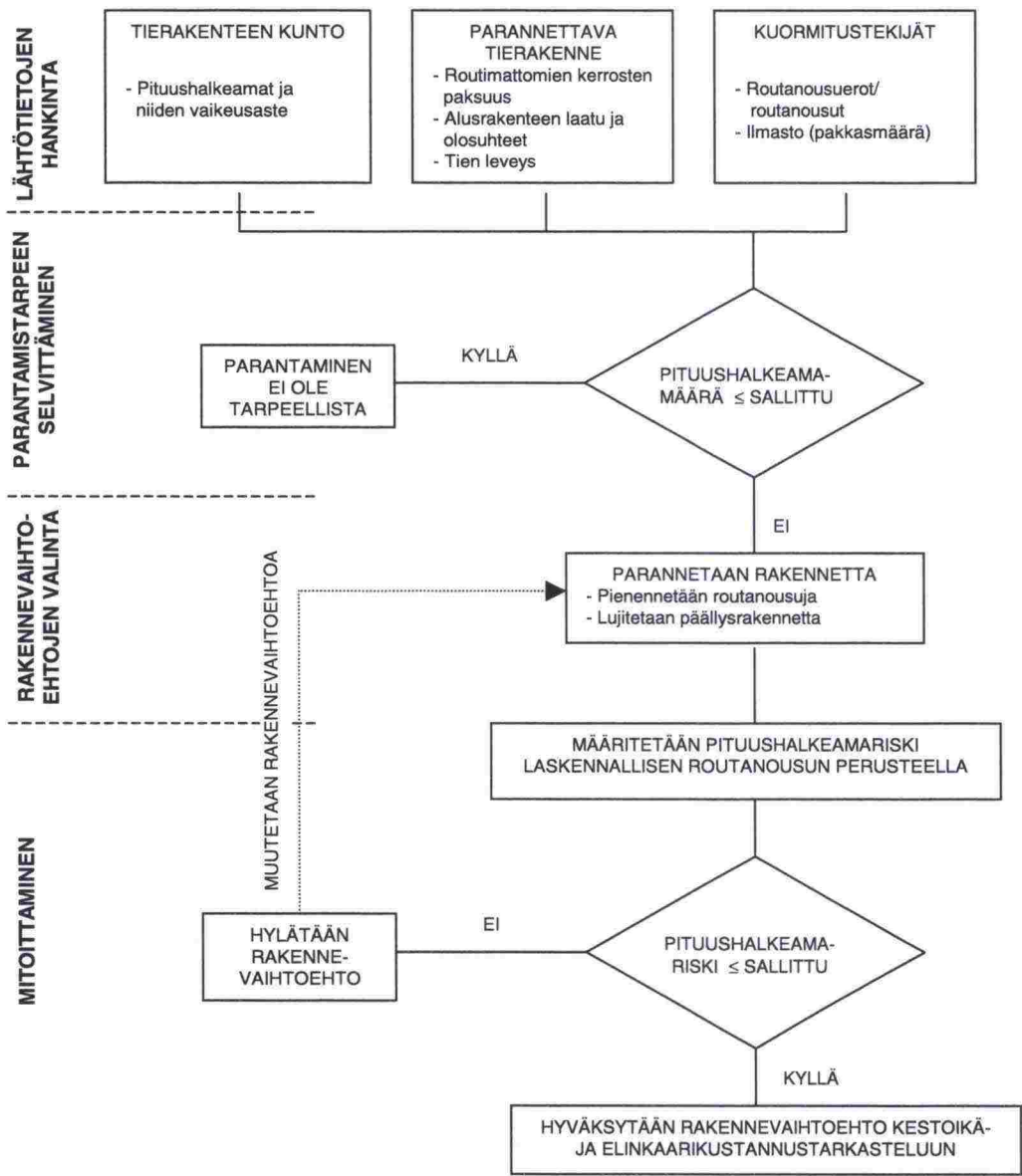


Kuva 1. Mitoitusmenettelyn osavaiheet.

Mitoitusmenettelyllä pyritään vaikuttamaan vaurioiden syihin, mikä edellyttää että vauriomekanismit tunnetaan. Kunkin vauriotyyppin osalta käytännön mitoittaminen sisältää lähtötietojen hankinnan, parantamistarpeen selvittämisen, rakennevaihtoehtojen valinnan ja vertailun mitoittamalla.

PITUUSHALKEAMIEN MITOITTAMINEN

Lähtötietojen hankinta sisältää pituushalkeamien ja niiden vaikeusasteen inventoinnin, routimattomien kerrosten (+ tien leveyden) määrittämisen sekä routanousuerojen/routanousujen mittaamisen ja ilmastotietojen selvittämisen (kuva 2).

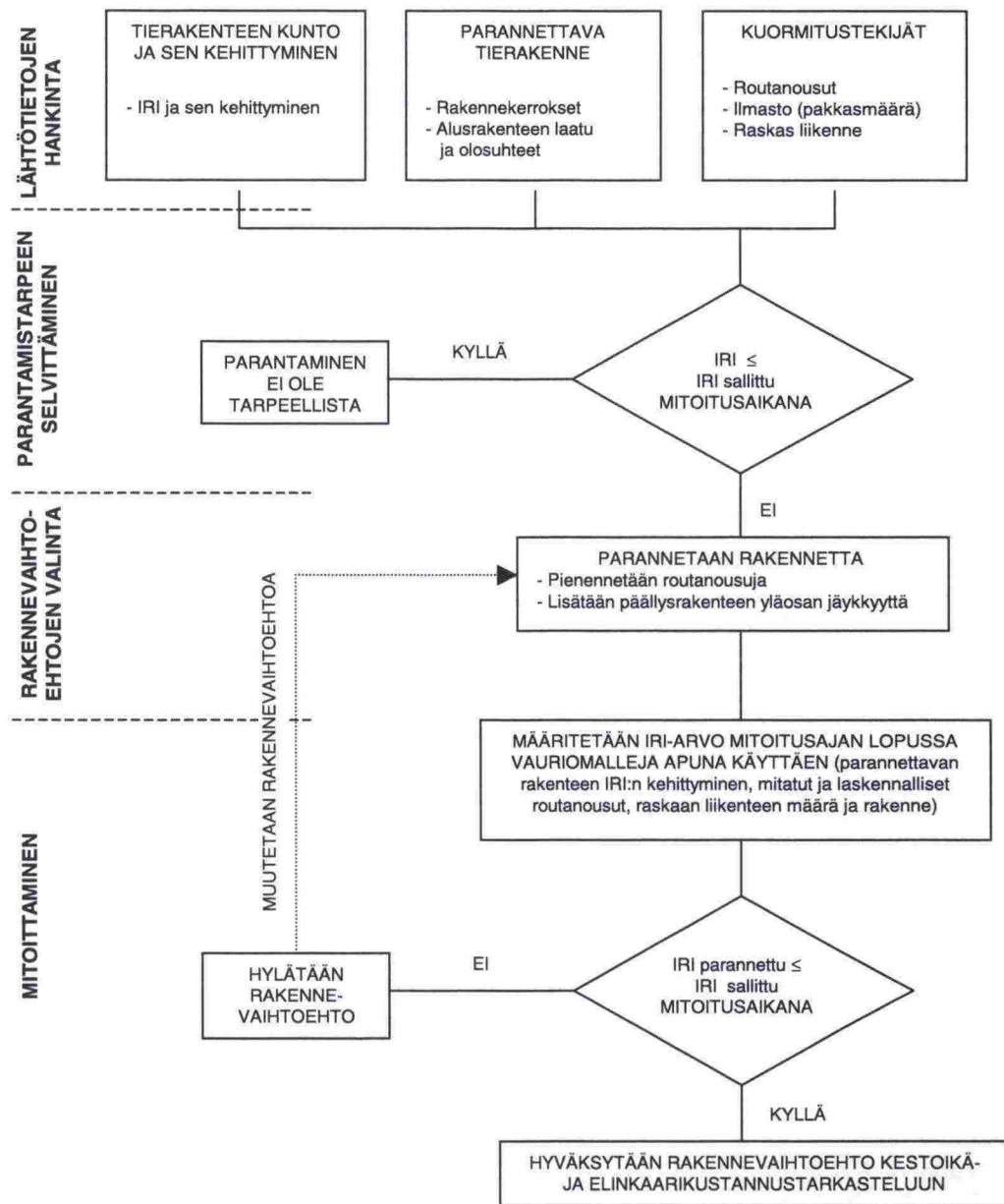


Kuva 2. Mitoitusmenettely pituushalkeamien suhteen.

Parantamisen tarpeellisuus selvitetään inventoitujen pituushalkeamien ja niiden vaikeusasteen perusteella. Rakennevaihtoehtojen valinta perustuu joko routanousujen vähentämiseen tai päällysrakenteen yläosan lujittamiseen. Varsinaisessa mitoittamisessa tarkastellaan laskennallisten routanousujen ja tien leveyden avulla pituushalkeamariskiä.

PITUUSSUUNTAISEN EPÄTASAISUUDEN MITOITTAMINEN

Mitoittaminen riippuu siitä, aiheutuuko pituussuuntainen epätasaisuus pääasiassa routimisesta vai alusrakenteen painumisesta. Routimisesta johtuvan pituussuuntaisen epätasaisuuden mitoittaminen on esitetty kuvassa 3. Painumisesta johtuvan pituussuuntaisen epätasaisuuden mitoittamisessa sovelletaan paksuille AB-päällysteille kehitettyjä (TPPT) menetelmiä.



Kuva 3. Mitoitusmenettely pituussuuntaisen epätasaisuuden (IRI) suhteen.

LIITE 4/4

Lähtötietojen hankinta sisältää pituussuuntaisen epätasaisuuden ja sen kehittymisen inventoinnin, rakennetiedot, routanousut ja ilmastotiedot sekä raskaan liikenteen määrän.

Parantamisen tarpeellisuus selvitetään pituussuuntaisen epätasaisuuden ja sen kehittymisnopeuden perusteella.

Rakennevaihtoehtojen valinta perustuu routanousujen pienentämiseen, päällysrakenteen yläosan jäykkyyden lisäämiseen ja/tai alusrakenteen homogenisointiin.

Mitoittaminen perustuu parannettavan tien pituussuuntaiseen epätasaisuuteen ja rakennevaihtoehdolle vauriomalleilla arvioituun pituussuuntaiseen epätasaisuuteen.

POIKKISUUNTAISEN EPÄTASAISUUDEN MITOITTAMINEN

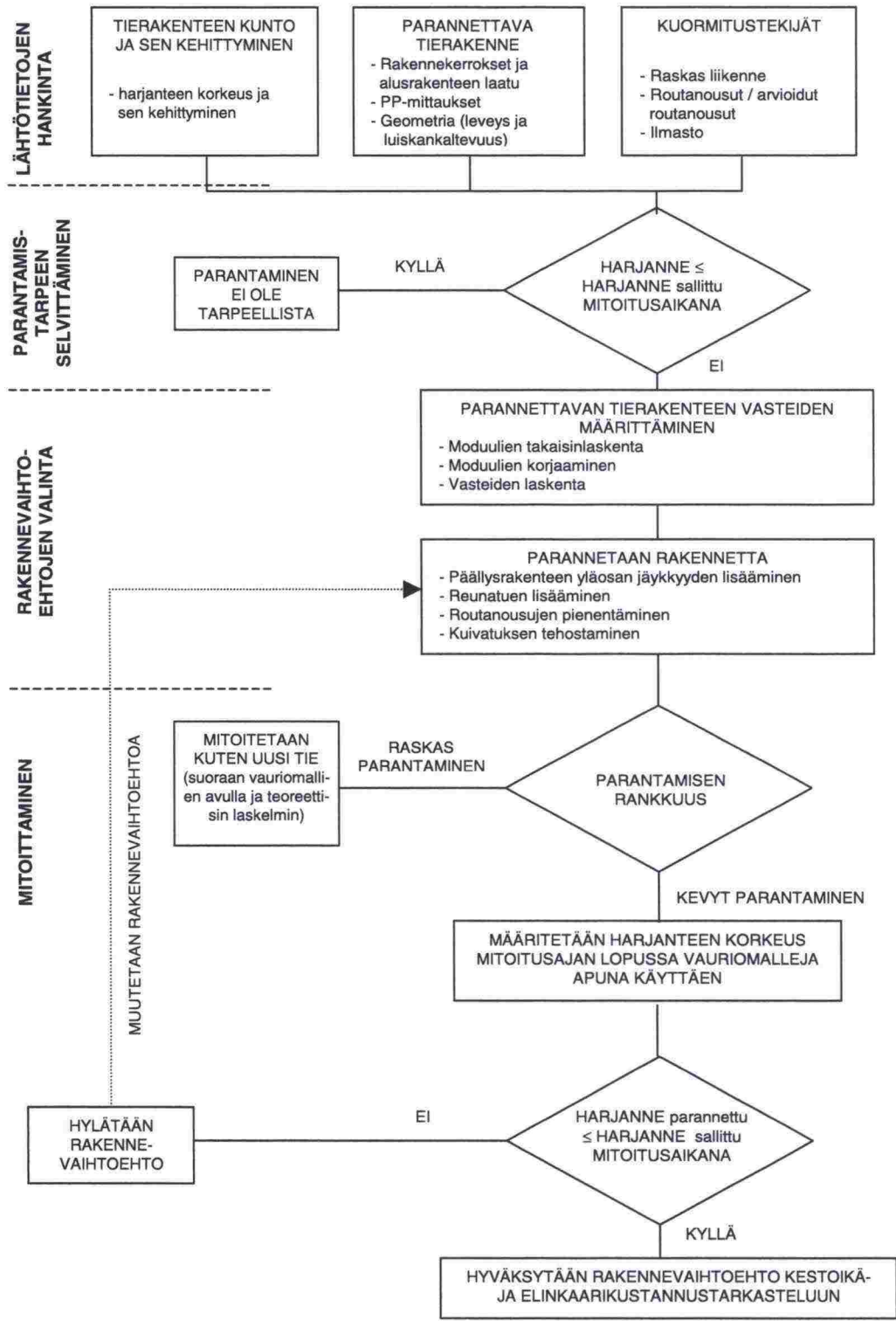
Lähtötietojen hankinta sisältää harjanteen korkeuden ja sen kehittymisen inventoinnin, rakennetiedot, pp-taipumamittaukset, raskaan liikenteen määrän, routanousut (mitatut/arvioidut) sekä ilmastotiedot (kuva 4).

Parantamisen tarpeellisuus selvitetään harjanteen korkeuden ja sen kehittymisnopeuden perusteella.

Rakennevaihtoehtojen valinta perustuu päällysrakenteen yläosan jäykkyyden lisäämiseen, reunatuen lisäämiseen, routanousujen pienentämiseen ja/tai kuivatuksen tehostamiseen.

Kevyen parantamisen mitoittaminen perustuu parannettavan tien harjanteen kehittymiseen ja vauriomalleilla arvioituun harjanteen muodostumiseen tie-rakenteen vasteita apuna käyttäen.

Raskaassa parantamisessa mitoittaminen perustuu vauriomallien mukaiseen harjanteen muodostumiseen ja teoreettisiin laskelmiin samalla tapaa kuin uudella tiellä.



Kuva 4. Mitoitusmenettely poikkisuuntaisen epätasaisuuden (harjanne) suhteen.

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

3/1995	Kuormituskestävyyden tavoitekriteerit. TIEL 3200281
15/1995	Betonipäällysteen seuranta, vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 2. TIEL 3200293
20/1995	Sään ja hydrologisten tekijöiden vaikutus kevätkelirikkoon. TIEL 3200298
30/1995	TPPT:n laatusuunnitelma. TIEL 3200308
43/1995	Tukitelineperustusten kantokyky. TIEL 3200319
44/1995	Kaltevan maanpinnan vaikutus perustusten kantokykyyn. TIEL 3200320
45/1995	Maanvaraisten perustusten kantokyvyn laskenta elementtimenetelmällä. TIEL 3200321
54/1995	Veittostensuon koerakenteen toiminta ja laadun arviointi. TIEL 3200330
58/1995	Kestävän kehityksen tierakenteet - ideakilpailu. TIEL 3200333
94/1995	Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus. TIEL 3200369
6/1996	Tuotannon laatu; Kuormitus ja routakestävyysrakenteet. TIEL 3200375
13/1996	Masuunihiekkastabilointi. TIEL 3200382
16/1996	Tavoitekriteerit (TPPT). TIEL 3200385
17/1996	Moreenin hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin (TPPT). TIEL 3200386
29/1996	Tien rakennekerrosmateriaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla. TIEL 3200397
32/1996	Häiriintymättömien maanäytteiden otto. TIEL 3200400
33/1996	Ödometrikoe. TIEL 3200401
34/1996	Sitomattomien materiaalien moduulit; Täydentävien kuormituskokeiden tulokset, osa 1. TIEL 3200402
35/1996	Havaintoteiden asfalttipäällysteiden moduulit. TIEL 3200403
36/1996	Eriste- ja kevennysmateriaalien routakestävyys; Palaturve. TIEL 3200404
37/1996	Koerakennekohteiden materiaalien routakestävyys; Pohjoiset kohteet. TIEL 3200405
38/1996	Rakennerratkaisujen alustava suunnittelu ja kehittäminen. TIEL 3200406
39/1996	Pilari- ja massastabiloinnin tuotantotekniikka. TIEL 3200407
44/1996	Sitomattomien materiaalien moduulit; Muutosmoduulin arviointi korkearakeisilla kiviaineksilla, osa 2. TIEL 3200412
46/1996	LD-teräskuona tienrakennusmateriaalina. TIEL 3200414
70/1996	Kantavan kerroksen asfalttibetoni; Referenssimateriaalin ominaisuudet. TIEL 3200437
77/1996	Syvästabilointi kehittyvänä pohjavahvistusmenetelmänä; International Conference IS-Tokio '96. TIEL 3200444

78/1996	Moreenin rakeistaminen pelleteimalla; Nykytilaselvitys. TIEL 3200445
4/1997	Siltojen perustusten geoteknisen mitoituksen vertailu eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200452
5/1997	Tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurirakenteen vertailevat mitoituslaskelmat eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200453
11/1997	Betonipäälysteen seuranta vt 4 Kempele-Kiviniemi. Kuntoraportti TIEL 3200458
23/1997	Masuunihiekan käyttö päälysrakennekerroksissa. TIEL 3200470
30/1997	Teiden pohjavesisuojausissa käytettävien maatiivisteiden vedenläpäisevyyden määrittäminen. TIEL 3200476
35/1997	Palaturpeen käyttö tierakenteessa. TIEL 3200481
18/1998	Moreenin jalostaminen pelleteimalla. TIEL 3200509
23/1998	Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 1: Sementillä sidotut materiaalit, kirjallisuusselvitys. TIEL 3200514
24/1998	hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 2: Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyys. TIEL 3200515
25/1998	Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 3: Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen. TIEL 3200516
29/1998	Sementtistabiloidut materiaalit, loppuraportti. TIEL 3200521
55/1998	Tuotannon laatu 1998
42/1999	Bitumi-sementti-komposiittien ominaisuudet ja tutkimusmenetelmät TIEL 3200585
17/2000	Life cycle assessment of road construction. TIEL 3200606E
(Geotekniikan informaatiojulkaisuja:)	
2/1993	Massanvaihto. TIEL 3200127
21/1993	Pengerpaalutus. TIEL 3200147
24/1993	Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150
39/1994	Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä. TIEL 3200248
42/1994	Nauhapystyöjitus. TIEL 3200251
67/1994	Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. TIEL 3200276
79/1995	Tieleikkausten pohjatutkimukset. TIEL 3200354
79/1996	Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200446
18/1997	Syvästabiloinnin mitoitusohje. TIEL 3200465
28/1997	Tien kevennysrakenteet. TIEL 3200475